

# Design for X

Beiträge zum 24. DfX-Symposium  
September 2013

Dieter Krause  
Kristin Paetzold  
Sandro Wartzack  
(Hrsg.)



The Design Society is a charitable body,  
registered in Scotland, number SC 031694

---

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

## Impressum

TuTech Verlag  
TuTech Innovation GmbH  
Harburger Schloßstr. 6-12  
21079 Hamburg  
Tel.: +49 40 76629-0  
Fax: +49 40 76629-6129  
E-Mail: [verlag@tutech.de](mailto:verlag@tutech.de)  
[www.tutechverlag.de](http://www.tutechverlag.de)

Nachdruck, Vervielfältigung, Speicherung oder Übertragung in elektronische, optische, chemische oder mechanische Datenhaltungs- oder -verwertungssysteme sind -auch auszugsweise- ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung von TuTech Innovation GmbH verboten.

Die Verwertung von Informationen aus *Design for X | Beiträge zum 24. DfX-Symposium* zum Zweck der gewerblichen Informationsvermittlung ist nicht zulässig.

Alle Rechte vorbehalten.  
© TuTech Innovation GmbH, Hamburg, 2013

ISBN 978-3-941492-63-9

---

## Vorwort

Ins Leben gerufen von Prof. Harald Meerkamm wird das Symposium Design for X von seinen ehemaligen Doktoranden Prof. Kristin Paetzold, Prof. Sandro Wartzack und mir fortgeführt. Dieses Jahr findet das 24. DfX-Symposium in der Nähe von Hamburg statt. Wir möchten damit jungen wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern eine Möglichkeit geben, ihre Ideen und neuen Ansätze im Bereich der Produktentwicklung zu präsentieren und zu diskutieren.

Ich freue mich sehr, dass wieder viele Kollegen und Teilnehmer aus der Industrie der Einladung gefolgt sind und mit ihren Erfahrungen die Diskussionen bereichern werden. Ebenso freue ich mich, dass erneut wieder so viele junge wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter dieser Einladung gefolgt sind. Aufgrund der erfreulich hohen Zahl eingereicherter Beiträge, die die Kapazität des DfX-Symposiums überschritten hat, mussten wir eine Auswahl treffen, erstmals als blind review durchgeführt. Die thematischen Schwerpunkte des diesjährigen Symposiums bilden dabei die Themen

- Modularisierung & Variantenmanagement,
- Strukturanalyse, Simulation & Test sowie
- Leichtbau.

Darüber hinaus wird die Tradition des DfX-Symposiums fortgesetzt, indem auch eine Vielzahl von fachlich spannenden Beiträgen aus dem Bereich des „Design for X“ berücksichtigt wurde.

Ich danke meinen Kollegen und Mitveranstaltern Kristin Paetzold und Sandro Wartzack für Ihr eingebrachtes Engagement, meinem Mitarbeiter Herrn Nicolas Gebhardt für die Organisation des Symposiums und natürlich allen Teilnehmern für ihre Beiträge und freue mich auf interessante Vorträge, sowie intensive und lebhaft Diskussionen.

Hamburg, 19. September 2013

Prof. Dieter Krause



---

# Inhaltsverzeichnis

## Session 1

Unternehmenstypologisches Komplexitätsmanagement  
*Paul Christoph Gembarski, Roland Lachmayer*  
*Leibniz Universität Hannover*.....1

Komplexitätskosteneffekte modularer Produktfamilien  
*Sebastian Ripperda, Dieter Krause*  
*Technische Universität Hamburg-Harburg*.....13

Referenzmodell zur Analyse von Baukastensystematiken in der Nutzfahrzeugindustrie  
*Birgit Braun, Maximilian Kissel, Armin Förg, Matthias Kreimeyer*  
*Technische Universität München, MAN Truck & Bus AG*.....25

## Session 2

Effizientes Variantenmanagement durch modulare Produktkonfiguratoren  
*Peter Gerber*  
*Schaeffler Technologies AG & Co. KG*.....39

Vom schließmaßbasierten Toleranzmanagement zum eigenschaftsbasierten Robust Design  
*Philipp Ziegler, Sandro Wartzack*  
*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*.....45

Analyse von Unsicherheitsverknüpfungen im Lebenslauf lasttragender Systeme mit der UMEA Methodik  
*Tobias Eifler, Sebastian Zier, Hermann Kloberdanz, Herbert Birkhofer*  
*Technische Universität Darmstadt*.....57

---

## Session 3

Anwendung der Wertebereichsvariation am Beispiel des Energieversorgungssystems eines Satelliten

*Thierry Sop Njindam, Tanja Nemetzade, Kristin Paetzold, Roger Förstner  
Universität der Bundeswehr München, Astrium GmbH.....71*

Design for Value Chain – Erste Praxiserfahrungen einer Methodenentwicklung und -einführung

*Markus Richter, Marc Griesbach, Jörg Dalhöfer  
Dräger Safety AG & Co. KGaA.....85*

Konstruieren mit generativen Fertigungsverfahren - Gestalterische Lösungen für die Substitution von Serienbauteilen

*Bastian Leutenecker, Quentin Lohmeyer, Mirko Meboldt  
Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich.....97*

Geometrischer Abgleich von virtuellem Anlagenmodell und realer Anlage

*Inga Thiel, Michael Vielhaber, Tomas Bär  
Daimler AG, Universität des Saarlandes.....107*

---

## Session 4

Optimierung von Bauteilen auf Basis von Produktnutzungsinformationen <i>Bastian Sauthoff, Roland Lachmayer</i> <i>Leibniz Universität Hannover</i> .....	119
Ansatz zur CAD-integrierten Rückführung von Konstruktionsgeometrie aus Formoptimierungsergebnissen <i>Thomas Stangl, Sandro Wartzack</i> <i>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg</i> .....	131
Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Systemgrenzengestaltung bei dy- namischen Versuchen <i>Olaf Rasmussen, Benedikt Plaumann, Dieter Krause</i> <i>Technische Universität Hamburg-Harburg</i> .....	143

## Session 5

Methoden für die Entwicklung modularer Produkte bei der Jungheinrich AG <i>Julia Lechnitz, Sandra Eilmus</i> <i>Jungheinrich AG, Technische Universität Hamburg-Harburg</i> .....	153
Anwendung adaptronischer Lösungsprinzipien zur Überwindung von Zielkon- flikten <i>David Inkermann, Thomas Vietor</i> <i>Technische Universität Braunschweig</i> .....	163
Die Auswirkung der Reihenfolge von Mess- und Simulationsdaten auf das Ergebnis der Kreuzvalidierung in KDD Prozessen <i>Christof Küstner, Thilo Breitsprecher, Sandro Wartzack</i> <i>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg</i> .....	175

---

## Session 6

Realisierung komplexer Versuchsaufbauten in Hochdrucktestumgebungen  
*Karen Malone, Ralf Seemann, Dieter Krause*  
*Technische Universität Hamburg-Harburg*.....187

Die eigenschaftsbasierte Produktentwicklung unter Berücksichtigung der differenziellen Anforderungen älterer Nutzer  
*Thomas Luft, Stefan Kamin, Jörg Miehl, Frieder R. Lang, Sandro Wartzack*  
*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*.....197

Pflege modularer Produktfamilien nach dem Markteintritt durch die Produktentwicklung  
*Tammo Bahns, Dieter Krause*  
*Technische Universität Hamburg-Harburg*.....209

## Session 7

Notwendigkeit von detaillierteren FE-Modellen zur Effizienzsteigerung der Produktion von Flugzeugküchen  
*Martin Wohlgemuth, Patrick Spielberger, Ralf Seemann*  
*phi Engineering Services GmbH, TU Hamburg-Harburg*.....221

Evaluierung unterschiedlicher Theorien zur Berechnung beanspruchungsge-rechter Faserorientierungen in CFK-Strukturen  
*Daniel Klein, Steffen Caballero, Sandro Wartzack*  
*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*.....231

# Unternehmenstypologisches Komplexitätsmanagement

Paul Christoph Gembarski, Roland Lachmayer  
*Institut für Produktentwicklung und Gerätebau  
Leibniz Universität Hannover*

## 1 Einleitung

Die aktuelle Marktentwicklung in vielen Branchen zeigt eine Tendenz zu immer mehr kundenspezifischen Produkten. Zudem werden technische Produkte immer komplizierter, ebenso wie die Anforderungen an die Produktdokumentation. Ein anerkanntes Ziel ist es, die vom Kunden geforderte und wahrgenommene externe Vielfalt mit einer minimalen internen Vielfalt mit geringstmöglichem organisatorischem Aufwand abzudecken. Oftmals gleichbedeutend wird der Begriff der Komplexität verwendet, was neben der Vielfalt jedoch organisationstheoretische Aspekte einschließt.

Im Fokus unserer Arbeit liegt der richtige Umgang mit Vielfalt und Komplexität, wozu nicht nur die variantengerechte Produktentwicklung beurteilt wird, sondern auch neue Ansätze in Bezug auf Organisation, Logistik und Wissensmanagement. Dabei ist insbesondere der Nutzen der eingesetzten Methoden quantifizierbar zu machen.

Anhand von Betriebs- und Branchentypologien entwickeln wir Modelle, die eine Einschätzung ermöglichen, welche Methoden für die Anforderungen eines bestimmten Unternehmens sinnvoll einzusetzen sind und wie sie Komplexität beeinflussen.

---

## 2 Komplexität und komplexe Systeme

Zunächst werden bestehende Ansätze und Definitionen für Komplexität aus der Literatur recherchiert und analysiert. Um ein zielgerichtetes Komplexitätsmanagement betreiben und je nach Stoßrichtung der Maßnahmen unterschiedliche Strategien bereitstellen zu können, müssen sowohl einzelne Dimensionen von Komplexität, als auch unterschiedliche Klassen von komplexen Systemen differenziert werden. Diese werden im Anschluss vorgestellt.

### 2.1 Komplexitätsdefinition

Der Ursprung der Komplexitätstheorie lässt sich in der Systemwissenschaft bzw. der Kybernetik finden. Diese Ansätze wurden bereits für unterschiedlichste Wissenschaftsdisziplinen (z.B. Natur-, Sozial und Arbeitswissenschaften) adaptiert und weiterentwickelt [1]. Die Analyse dieser zeigt, dass allgemeingültige Definitionen oder Betrachtungsebenen nicht existieren, Komplexität wird stattdessen auf die jeweiligen Probleme abgebildet und verkürzt. Allgemein anerkannt ist lediglich, dass sich komplexe Systeme mindestens in den Einheiten Vielfalt/Varietät und Dynamik darstellen lassen, wobei die Dynamik mittelbar ebenfalls für Vielfalt steht (Vielfalt unterschiedlicher Systemzustände und der Veränderungsmöglichkeiten) [2].

Wir beschreiben mit Komplexität ein System, welches sich durch eine große Anzahl an gleichen oder andersartigen Subsystemen und Bauelementen zusammensetzt, die beliebig miteinander verknüpft sind. Das System kann über die Zeit verschiedene Zustände annehmen, das Systemverhalten zeigt jedoch Unschärfe, da eine Prognosefähigkeit im Sinne einer Simulation nicht vollständig realisierbar ist. Die Systemelemente sind nicht auf die Verwendung in einem einzelnen System beschränkt, sondern können im Sinne der Kommutalität ebenfalls in anderen Systemen eingesetzt werden.

### 2.2 Komplexitätsmessung

Ebenso wenig wie es eine allgemeingültige Definition für Komplexität gibt, existiert bisher kein einheitliches Verständnis über die objektive Messung von Komplexität. Anerkannt ist lediglich, dass die Vielzahl und Heterogenität von Systemelementen relevant ist [3].

Aus der obigen Komplexitätsdefinition wird deutlich, dass ein System mit der Zeit mehrere Zustände annehmen kann. Prinzipiell kann dieses über die Vielfaltdimension abgebildet werden. Entscheidend für den Handlungsbedarf ist hingegen die Prognose, ob sich eines der Systemelemente (und dadurch

zwingend auch das System selbst) in einem bestimmten Erwartungshorizont verändern wird. Wir definieren deshalb die Dynamik eines Systems als die Änderungswahrscheinlichkeit eines Systemelements / Systems. Darüber hinaus ist das System u.U. nicht vollständig determiniert, es zeigt folglich Unschärfe.

Eingegrenzt auf die Ingenieurwissenschaften fehlt bisher die Einbeziehung von Kommunalitäten zwischen verschiedenen Systemen, so wie sie durch modulare Baukastensysteme begünstigt wird. Relevant für die Betrachtung von komplexen Systemen ist dieses vor dem Hintergrund, dass eine Änderung an einem Modul umso schwerwiegendere Auswirkungen hat, je häufiger es in unterschiedlichen Systemen eingesetzt wird. Wir definieren daher die Dimension Nichtlokalität als Maßeinheit für die systemübergreifende Verwendung von Systemelementen.

Tabelle 1: Komplexitätsdimensionen

DIMENSION	BESCHREIBUNG	ZEICHEN
Vielfalt	Anzahl der System- und Verknüpfungselemente	n
Heterogenität	Verschiedenheit der System- und Verknüpfungselemente	d
Dynamik	Veränderungswahrscheinlichkeit eines Systemelements / Systems	$\delta$
Unschärfe	Transparenz / Determiniertheit des Systems	$\phi$
Nichtlokalität	Verknüpfung von Systemelementen in andere Systeme	$\lambda$

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die exogenen Variablen zur Komplexitätsbeschreibung. Gegenstand unserer aktuellen Forschung ist unter anderem die Beschreibung von Rückkopplungen, die Veränderungen an einer Dimension in den anderen hervorrufen.

Als endogene Variable wird der Komplexitätsgrad eines Systems definiert. Hierfür werden aktuell mathematische Repräsentationen untersucht, die als Kombination der einzelnen Dimensionswerte verwendet werden können. Zu den betrachteten Verfahren gehören unter anderem Vektorrepräsentationen und höhere Normierungsverfahren.

## 2.3 Klassen komplexer Systeme

Anhand der fünf Dimensionen differenzieren wir anhand der Darstellung in einem Netzdiagramm unterschiedliche komplexe Systeme (der Flächeninhalt der Netzdiagramme ist dabei nicht als Repräsentation für den Komplexitätsgrad geeignet, da er gegenüber Achsentausch nicht invariant ist).

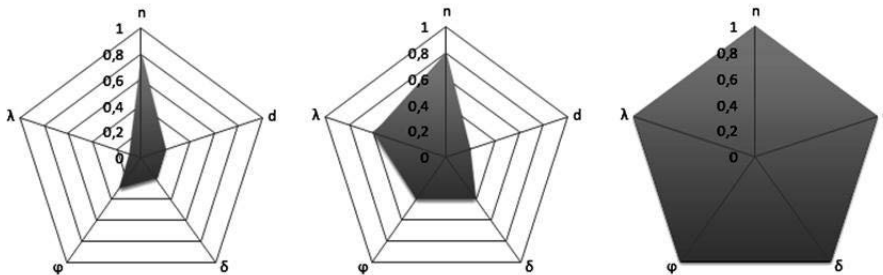


Bild 1: Darstellung von komplexen Systemen im Netzdiagramm

Einfach komplexe Systeme werden in der Abbildung durch eine ausgeprägte Spitze dargestellt (Abbildung oben, linke Darstellung). Dem gegenüber weisen mehrdimensional komplexe Systeme entweder mehrere Spitzen oder eine ausgeprägte Fläche auf (mittlere Darstellung). Davon abgegrenzt belegen hyperkomplexe Systeme nahezu die gesamte Fläche. Jede der drei beschriebenen Systemformen löst jeweils unterschiedliche Handlungsbedarfe im Unternehmen aus, die im Komplexitätsmanagement aufgegriffen werden müssen.

Beispiel: Unternehmen A ist ein Hersteller von Kegelradgetrieben mit kleiner Konstruktionsabteilung. Die Produkte lassen sich gut über Konstruktionsregeln beschreiben, was derzeit kaum Anwendung findet. Das überwiegende Spektrum besteht aus Standardgetrieben, die direkt per Katalog bestellt werden können, darüber hinaus werden diese kundenspezifisch angepasst. Die maximal in einem Getriebe verbaute Teileanzahl liegt bei ca. 80 Bauteilen. Der aktive Teilestamm beträgt etwa 20.000 Zeichnungen, von denen etwa 65 % als 3D-CAD-Daten vorliegen. Der Nummernschlüssel ist projekt- / baureihenspezifisch, was einen hohen Anteil an Doubletten bedingt. Darüber hinaus wird kein PDM-System eingesetzt. Die Bauteile werden vollständig fremdbeschafft, die Endmontage erfolgt im Unternehmen selbst.

Aus einer Analyse von Konstruktionsabläufen, Produktspektrum, Stücklisten und Montageprozess ergibt sich für das Beispiel das folgende Komplexitätsprofil:

- Vielfalt: Basierend auf dem Teilestamm und der Anzahl der angebotenen Produktvarianten wird die Vielfalt bewertet.  $n = 0,8$
- Heterogenität: Der grundsätzliche Aufbau der Getriebe ist immer ähnlich, die Schnittstellenvarianten sind gering.  $d = 0,2$
- Dynamik: Die Wahrscheinlichkeit, dass sich das grundsätzliche Konstruktionsprinzip verändert, ist gering. Evtl. werden durch Innovationen in Lager- und Dichtungstechnik Anpassungen erforderlich.  $\delta = 0,1$
- Unschärfe: Das Katalogspektrum lässt sich gut erfassen, da aber nicht alle Zeichnungen (vor allem von kundenspezifischen Sondergetrieben) im 3D-CAD existieren und darüber hinaus kein PDM-System eingesetzt wird, können derzeit nicht alle theoretisch vorhandenen Varianten beschrieben werden. Die Vorhersage über zukünftige Sondergetriebe lässt sich bedingt treffen.  $\phi = 0,3$
- Nichtlokalität: Da ein projektspezifischer Nummernschlüssel verwendet wird, ist die Nichtlokalität  $\lambda = 0$ , d.h. eine Änderung im System hat keine Auswirkungen auf andere.

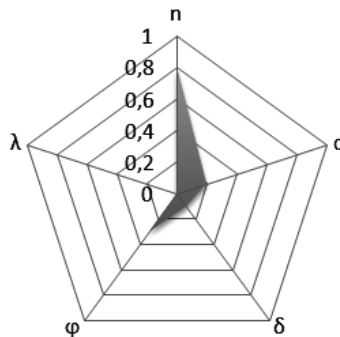


Bild 2: Komplexitätsprofil des Beispielgetriebeherstellers

---

### 3 Komplexitätsmanagement (XM)

Detaillierte und allgemeingültige Leitlinien, die zum Aufbau eines umfassenden Komplexitätsmanagement herangezogen werden können, existieren derzeit nicht, wie die Literaturrecherche weiterhin ergab. Eine Zuordnung zu Unternehmensprozessen und Verantwortlichkeiten, welche die Einordnung in den unternehmerischen Gesamtzusammenhang erlaubt, findet nur vereinzelt statt. Darüber hinaus bleiben die Autoren in ihren Darstellungen zu Methodenbausteinen sehr vage, es fehlt die Differenzierung nach Unternehmenstypen sowie objektive Möglichkeiten der Validierung.

Nach dem Modell von BOGASCHEWSKY ordnen wir das Komplexitätsmanagement dem Allgemeinen Managementprozess zu (dieser umfasst u.a. die Tätigkeiten Strategie- und Zielsetzung, Organisation und Strategisches Controlling, Personalentwicklung). Auf diese Weise wird das Komplexitätsmanagement dem direkten Wertschöpfungsprozess (Entwicklung, Beschaffung, Produktion und Absatz) und dem indirekt wertschöpfenden Unterstützungsprozess (u.a. Planung/ Steuerung/ Kontrolle, Logistik, QS, Informationsverarbeitung) übergeordnet [4].

Da die Abkürzung KM bzw. im Englischen CM innerhalb des Prozessmanagements bereits durch das Konfigurationsmanagement (im Englischen Configuration Management) besetzt ist, verwenden wir XM als Abkürzung für das Komplexitätsmanagement (im Englischen Complexity Management).

#### 3.1 Betrachtungsebenen

Eine zu eng gefasste XM-Definition birgt das Risiko, durch Vereinfachung wesentliche Aspekte für einen die gesamte Unternehmenssituation abdeckenden Ansatz außer Acht zu lassen. Aufgrund der Vielschichtigkeit des Komplexitätsproblems ist für ausreichende Differenzierungsmöglichkeiten zu sorgen, so dass neben Produkt- auch Organisationssysteme gehandhabt werden können.

Die Komplexitätsbeherrschung wird in drei Leistungsdimensionen untergliedert, die sich aus einer Befragung des WZL der RWTH Aachen innerhalb der Automobilzulieferindustrie als vorrangig erwiesen haben [5]:

- Fähigkeiten zur Beherrschung der Produktarchitekturkomplexität
- Fähigkeiten zur Beherrschung der Funktionskomplexität
- Fähigkeiten zur Beherrschung der Prozesskomplexität

---

Daraus leiten wir auch unter Berücksichtigung des Ansatzes von JESCHKE aus dem Bereich der Standardisierung folgende Definitionen ab, die gleichzeitig die Betrachtungsebenen für das XM darstellen [6]:

- Produkt-XM: Maßnahmen in unterschiedlichen Unternehmensbereichen, welche die Komplexitätsgestaltung von Produkten und deren Baugruppen sowie Einzelteilen bezwecken.
- Technologie-XM: Maßnahmen, welche die Komplexitätsgestaltung der technologischen Einrichtungen in direkten und indirekten Bereichen bezwecken.
- Prozess-XM: Maßnahmen, welche die Komplexitätsgestaltung der Aufbau- und Ablauforganisation bezwecken.

### 3.2 XM-Tätigkeiten

Innerhalb des XM sind zunächst die zu verwaltenden Elemente und ihre Abhängigkeiten zu bestimmen. Diese Ist-Aufnahme spiegelt die Komplexitätsidentifikation wider. Das Ergebnis ist unter anderem ein Netzdiagramm mit den Messergebnissen der Komplexitätsdimensionen.

Hieran lässt sich im zweiten Schritt die Komplexitätsoptimierung planen und durchführen. Liegt ein einfach komplexes System vor (vgl. 2.3), so kann die Stoßrichtung für das XM direkt aus dem Netzdiagramm abgelesen werden, z.B. die Verringerung der Vielfalt innerhalb der Produktkomplexität. Die Komplexitätsoptimierung ist dabei nicht einzig auf die Komplexitätsreduktion beschränkt, sondern bedeutet u.U. eine lokale Komplexitätssteigerung. Bezogen auf Produkt und interne Schnittstellen kann eine erhöhte Komplexität zu deutlich verbesserter Komplexität auf den Betrachtungsebenen der Produktarchitektur und der Fertigung (Technologie-XM) führen, wie sich durch zahlreiche Beispiele der Differenzialbauweise und von modularen Baukastensystemen belegen lässt. Umgekehrt kann eine Veränderung des Nummernschlüssels (weg von einer sprechenden Nummer) zu Erhöhung der Komplexität bei Kommissionierung und Montage führen; die Produktvielfalt, ausgedrückt durch den aktiven Teilestamm, verringert sich durch eine gesteigerte Wiederverwendung und die Beseitigung von Doubletten.

Bezogen auf den Planungshorizont zählen wir die Komplexitätsoptimierung zu den operativen Maßnahmen mit dem Ziel kurz- bis mittelfristig Potenziale freizusetzen.

Strategische Maßnahmen werden durch Komplexitätsplanung und -kontrolle abgebildet. Sie legen damit die Komplexitätsziele in einem langfristigen Zeitraum fest.

### 3.3 Methoden- und Prozessbausteine

Abhängig von der jeweiligen Betrachtungsebene und den Managementtätigkeiten müssen Methoden und Prozesse bereitgestellt werden, mit denen die Erreichung der Komplexitätsziele eines Unternehmens bewerkstelligt werden kann. Die Identifikation von relevanten Methoden- und Prozessbausteinen sowie möglichen unterstützenden Softwaresystemen und Spezifikationstechniken ist Gegenstand unserer aktuellen Forschung.

### 3.4 House of Complexity

Die bisherigen Ausführungen fassen wir im House of Complexity zusammen. Die Komplexität in einem Unternehmen wird von den drei Säulen Produkt-, Technologie- und Prozess-XM getragen. Diese fußen auf den XM-Tätigkeiten Identifikation, Optimierung sowie Planung und Kontrolle. Innerhalb der Tätigkeiten stehen unterschiedliche Methoden- und Prozessbausteine zur Verfügung, die abhängig von der Unternehmenstypologie eingesetzt werden müssen. Anders ausgedrückt führen also unterschiedliche Unternehmenstypologien zu unterschiedlichen Methoden- und Prozessbausteinen.

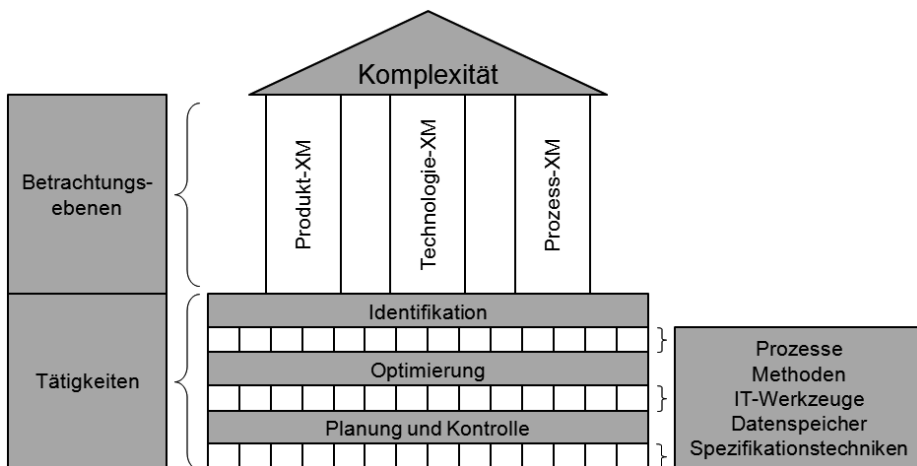


Bild 3: House of Complexity

---

## 4 XM-Prozess nach KOSIMA

In unserem hannoveraner Projekt KOSIMA (komplexe Systeme und integriertes Management) wird in Anlehnung an die prozessualen Managementmethoden wie z.B. Qualitäts-, Konfigurations-, oder Risikomanagement ein integriertes Modell zum Komplexitätsmanagement entwickelt. Das Ziel ist es unter anderem einen wissenschaftlich fundierten und für die Ingenieurwissenschaften praktisch umsetzbaren Managementprozess aufzubauen.

Eine Anforderung hieran ist ein integrativer Ansatz, d.h., dass neben technisch funktionalen Beziehungen auch produktstrategische Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Weiterhin wird der Prozess in soweit flexibel gestaltet, sodass auch sich veränderte Wettbewerbssituationen oder ein neues Marktumfeld schnell adaptiert werden können.

Ausgehend von der Unternehmenstypologie sollen zunächst die zu verändernden Methoden und Prozesse identifiziert werden. Ist dieses erfolgt, so wird die Festlegung der Betrachtungsebenen sowie der grundsätzlichen Komplexitätsziele für ein Unternehmen möglich. Als Werkzeug für die Bestimmung der idealen Methoden wird das House of Complexity top-down durchlaufen, d.h. für die jeweiligen Bereiche Produkt-, Technologie- und Prozess-XM werden die Bausteine für die Tätigkeiten Identifikation, Optimierung sowie Planung und Kontrolle bestimmt. Die dafür am besten geeigneten Methoden und Prozesse sind auf Basis der Unternehmenstypologie klassifiziert.

Darüber hinaus muss das XM im Unternehmen organisatorisch mit Unterstützung der Leitung verankert werden. XM ist dabei nicht als einmalige Tätigkeit misszuverstehen, sondern muss statt dessen als kontinuierlicher Prozess mit ständiger Validierung der getroffenen Maßnahmen durchgeführt werden.

Verändert sich durch die Maßnahmen (oder durch externe Effekte) die eigene Marktposition, so ist die unternehmenstypologische Eingruppierung zu überprüfen und ggf. anzupassen, was evtl. zu anderen Methoden für das XM führt. Dementsprechend wird das House of Complexity erneut durchlaufen.

Die folgende Darstellung visualisiert den Prozess.

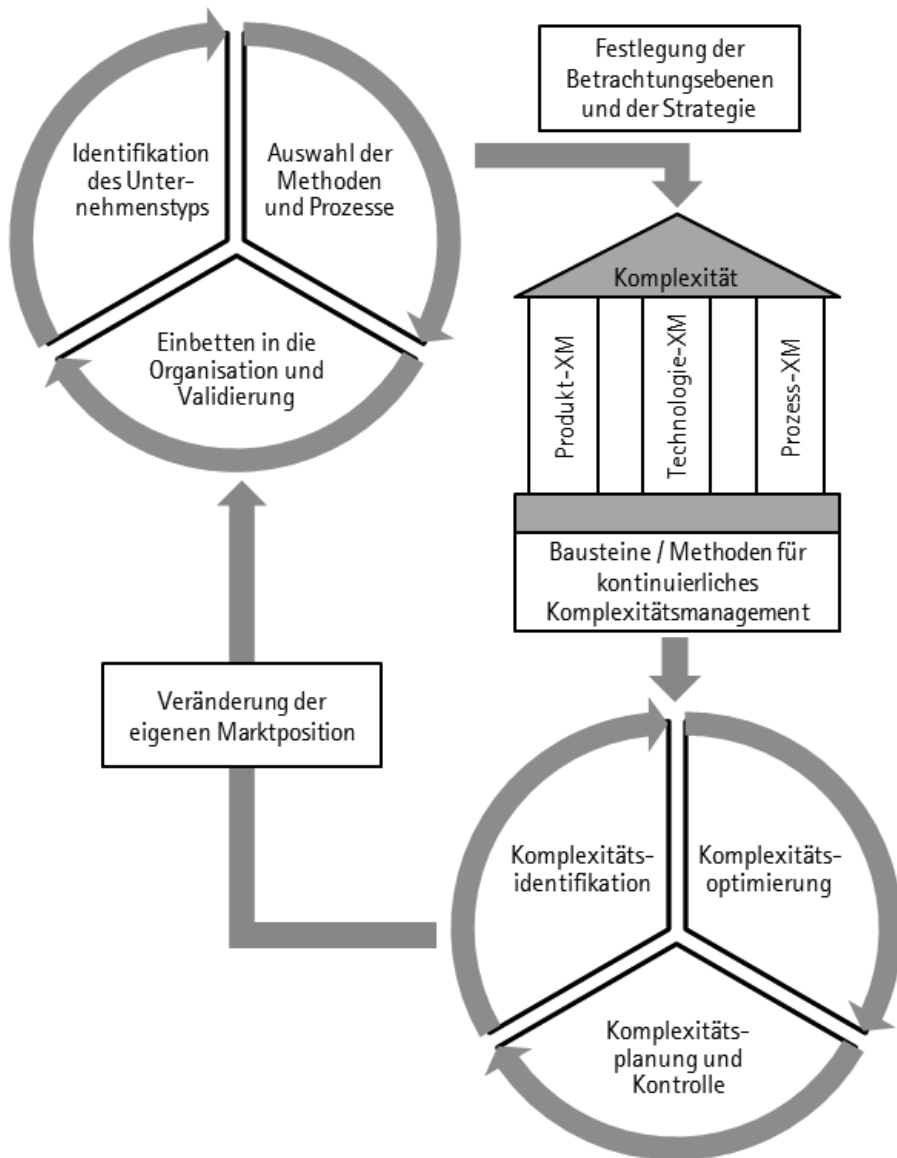


Bild 4: Komplexitätsmanagementprozess nach KOSIMA

---

Für das obige Beispiel des Herstellers von Kegelradgetrieben wurde bereits die Komplexitätsidentifikation für den Bereich des Produkt-XM vorgestellt (siehe 2.3). Das Komplexitätsprofil zeigt ein eindimensional komplexes System mit einer ausgeprägten Spitze in der Vielfaltsdimension, die mit den für diesen Unternehmenstyp passenden Werkzeugen verkleinert werden soll.

Im Rahmen der Komplexitätsoptimierung wird in dem konkreten Beispiel zunächst ein neuer Typenschlüssel generiert, der sich aus der Parametrik des Produkts ergibt. Darüber hinaus werden alle Parameter erfasst und in einem hierarchischen Parameterplan beschrieben. Hieraus wird in einem zweiten Schritt ein Konfigurationskonzept erarbeitet, das sich mit den Grundfunktionen der im Haus eingesetzten parametrischen CAD-Software regelbasiert abbilden lässt. Da es sich hier um ein KMU handelt, wäre die Investition in ein Stand-alone-Konfigurationssystem mit zu großen Kosten verbunden, darüber hinaus gestattet das CAD-System durch eine Kopplung mit MS Excel die Erstellung von eigenen technischen Produktkonfiguratoren. Um die Teilwiederverwendung nachvollziehbar zu gestalten, wird ein PDM-System implementiert, mit dem Versionierung und Verwendungsnachweis geführt werden.

Für den Vertrieb wird im nächsten Schritt ein Excel-basierter Stücklistenkonfigurator abgeleitet, mit dem bereits beim Verkaufsgespräch nicht sinnvolle oder nicht zugelassene Konfigurationen erkannt und verboten (oder als zuschlagspflichtig gekennzeichnet) werden.

Durch die Verwendung von Excel kann im Unternehmen die Pflege der Konfiguratoren selbst über die entsprechenden Tabellenwerke vorgenommen werden, die Pflege der Konstruktionsregeln im CAD-System erfolgt über eine Skriptsprache und bedarf nur grundsätzlicher Programmierkenntnisse.

Weitere mögliche Schritte:

- Darstellung des Produktspektrums als Konstruktionskatalog zur Unterstützung des Konfigurationsprozesses auch im Zuge webbasierter Konfiguration
- Dokumentation der Konstruktionsregeln in einem Konstruktionshandbuch
- Erweiterung des Konfigurators zur automatischen Erstellung der Produktdokumentation (Datenblatt, Wartungsanleitung, Ersatzteilkatalog, etc.)

---

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde hergeleitet, wie Komplexität nach dem KOSIMA-Ansatz beschrieben wird und welche unterschiedlichen Klassen von komplexen Systemen anhand dessen differenziert werden können. Daraus wurden Betrachtungsebenen und Managementtätigkeiten für das Komplexitätsmanagement vorgestellt, die im House of Complexity dargestellt und zu einem Komplexitätsmanagementprozess zusammengefasst werden.

Um aktuelle Daten über Bewusstsein und Umgang mit Komplexität und Variantenvielfalt zu erhalten, ebenso für die Verbreitung von Softwaresystemen, führen wir im 3. Quartal 2013 eine Evaluation innerhalb der Industrie durch. Die Auswertung dieser Evaluation wird eine Eingrenzung der verwendeten Methoden und Softwaresysteme ermöglichen, die für die tiefergehenden Untersuchungen zu analysieren sind. Die Bewertung der Methoden- und Systeme wird anschließend implizit mit geeigneten Kennzahlen und Indikatoren hergeleitet. Die Validierung der erstellten Systematik innerhalb von Industrieprojekten wird von uns angestrebt.

### Literatur

- [1] Bandte, H.: „Komplexität in Organisationen“, ISBN 9783835005782, DUV Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2007
- [2] Arnoscht, J.: „Beherrschung von Komplexität bei der Gestaltung von Baukastensystemen“, ISBN 9783863590284, Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen, 2011
- [3] Gießmann, M.: „Komplexitätsmanagement in der Logistik“, ISBN 9783899369649, Josef Eul Verlag, Köln, 2010
- [4] Bogaschewsky, R., Rollberg, R.: "Prozessorientiertes Management", ISBN 9783540640533, Springer Verlag, Berlin, 1998
- [5] Schuh, G.: "Managing Complexity in Automotive Engineering", Forschungsbericht RWTH Aachen, Aachen, 2008
- [6] Jeschke, A.: „Beitrag zur wirtschaftlichen Bewertung von Standardisierungsmaßnahmen in der Einzel- und Kleinserienfertigung durch die Konstruktion“, genehmigte Dissertation, TU Braunschweig, Braunschweig, 1997

## Komplexitätskosteneffekte modularer Produktfamilien

Sebastian Ripperda, Dieter Krause  
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Technische Universität Hamburg-Harburg*

### Abstract

The development of modular product families provides a way to reduce the total products cost. Costs forecasts in the early stages of product development support the development and selection of modular product structure concepts. In this paper a case study for predicting the costs of harness variants is shown. Next, according to the results of the case study, an approach for costs forecast by the identification and determination of the effects of complexity costs elements is presented. This approach represents an extension of the Integrated PKT-Approach for the development of modular product families.

### 1 Einleitung

In der Produktentwicklung stellt die Modularisierung von Produktfamilien eine Möglichkeit dar, Kundenforderungen nach kostengünstigen und individuellen Produkten zu befriedigen. Ein Merkmal modularer Produktstrukturen ist die Komponentenkommunalität, welche den Grad der Wiederverwendung von Komponenten beschreibt [1]. Komponentenkommunalität führt zu erhöhten Stückzahlen und vereinfachten logistischen Prozessen, wodurch erhebliche Kostenreduzierungen erreicht werden können [5]. Die zahlreichen Ansätze zur Entwicklung modularer Produktfamilien bieten nur wenig Unterstützung bei der Abschätzung der Kostenwirkung [13], obwohl Unternehmen bereits im

---

Auswahlprozess von modularen Konzepten eine erste Kostenabschätzung benötigen. Eine reine Betrachtung der Herstellkosten ist dabei nicht zielführend, da die komplexitätsreduzierende Wirkung modularer Produktfamilien nicht berücksichtigt wird. Der vorliegende Beitrag ordnet sich im Bereich der frühen Kostenprognose während der Produktentwicklung ein, zeigt eine Kostenprognose mit Hilfe des Durchschnittskostenverfahrens am Beispiel von Kabelbaumvarianten und beschreibt deren Weiterentwicklung unter Berücksichtigung von Komplexitätskosteneffekten.

## 2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die für das Verständnis grundlegenden Zusammenhänge und Begriffe bezüglich der Kostenprognose in der frühen Konzeptphase dargestellt. Zunächst wird die Kostenbeeinflussung in der Produktentwicklung aufgezeigt und eine Möglichkeit zur unternehmensinternen Komplexitätsreduzierung durch Verwendung modularer Produktfamilien vorgestellt. Anschließend werden die Definitionen der in diesem Beitrag verwendeten Kosten angegeben und bekannte Methoden zur Komplexitätskostenkalkulation beschrieben.

Der Begriff der Komplexität wird in der Literatur häufig verwendet und dabei unterschiedlich definiert. In diesem Beitrag wird darunter die Vielfalt und Vielzahl von Systemelementen, die Beziehungen zwischen den Elementen und deren zeitliche Veränderlichkeit verstanden (vgl. [2]).

### 2.1 Effekt der Kostenreduzierung durch Modularisierung

Die frühen Phasen der Produktentwicklung haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Kosten der weiteren Entwicklung und die Gesamtkosten eines Produktes [5]. Folglich müssen bereits in der Produktentwicklung zuverlässige Kostenprognosen erstellt werden, um Maßnahmen zu identifizieren, die die Produktkosten möglichst gering halten. Eine geeignete Maßnahme stellt die Verwendung modularer Produktstrukturen dar. Im Stand der Wissenschaft werden verschiedene Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien beschrieben, die das Ziel verfolgen die interne Vielfalt von Produkten im Unternehmen zu vermeiden, zu beherrschen oder zu reduzieren [13]. Vielfalt ist generell keine negative Eigenschaft. Sie ist notwendig, um zum Beispiel neue Kundengruppen zu erschließen und das Verkaufsvolumen zu vergrößern. Allerdings verursacht Vielfalt im Unternehmen Komplexität und somit auch Kosten, die zum Beispiel durch eine höhere Anzahl an Komponenten induziert werden [17]. Die bekannten Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien bieten nur wenig Unterstützung bei der Abschätzung der Kostenwir-

kung [13]. Nachstehend wird gezeigt, wie sich die Gesamtkosten eines Produktes im Einzelnen zusammensetzen und welche Kosten durch modulare Produktstrukturen gesenkt werden können.

Die Gesamtkosten eines Produktes bestehen aus den Einzelkosten (EK) und den Gemeinkosten (GK). Dabei können die Einzelkosten einem Kostenträger direkt zugeordnet werden. Dies ist bei den Gemeinkosten nicht möglich [14]. In diesem Beitrag zur Kostenprognose modularer Produktfamilien in der Konzeptphase werden Materialeinzelkosten (MEK), Fertigungseinzelkosten (FEK) und Gemeinkosten in Form von Komplexitätskosten (KK) berücksichtigt. Materialeinzelkosten beschreiben die Kosten für Werkstoffe und Kaufteile. Unter Fertigungseinzelkosten werden die Lohnkosten verstanden [5]. Die beiden vorgenannten Kosten addieren sich zu den Herstellkosten. Bezogen auf die monetären Effekte modularer Produktstrukturen wird sowohl von Kostensenkungen durch Skaleneffekte [5] als auch von Kostensteigerungen durch Überdimensionierung [16] berichtet. Ob die Herstellkosten steigen oder sinken, ist produkt- und konzeptabhängig. Jedoch können durch die Verwendung modularer Produktstrukturen die Gemeinkosten in Form von Komplexitätskosten gesenkt werden. Unter Komplexitätskosten werden Kosten für indirekte Tätigkeiten, welche dem Produkt nicht direkt zugeordnet werden können (z.B. zusätzlicher Aufwand in der Logistik), verstanden, die durch Komponenten- oder Variantenvielfalt entstehen (nach [21]).

Die diesem Beitrag als Grundlage dienende Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien ist der Integrierte PKT-Ansatz (Bild 1), der am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg entwickelt wurde.

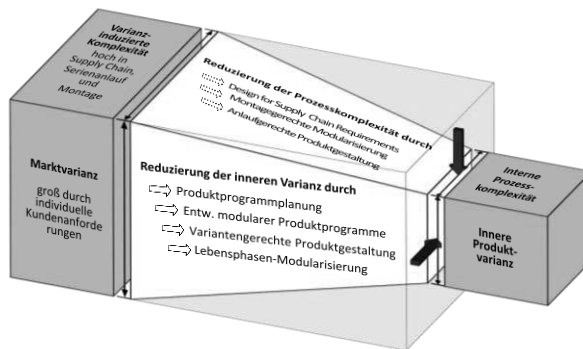


Bild 1: Integrierter PKT-Ansatz [12]

---

Die externe Vielfalt wird in dieser Methode als vom Markt gegeben angesehen und daher nicht verändert. Die produktseitige interne Vielfaltsreduzierung erfolgt im PKT-Ansatz über die Methodenbausteine der variantengerechten Produktgestaltung [10] und der Lebensphasen-Modularisierung [1]. Die vorteilhaften Ergebnisse dieser Methodenbausteine konnten anhand von zehn Fallstudien belegt werden [6]. Eine Untersuchung der Kostenwirkung wurde dabei allerdings weder produkt- noch prozesseitig berücksichtigt.

## 2.2 Methoden zur Komplexitätskostenkalkulation

Da das Hauptziel der Modularisierung in der Komplexitätsreduktion liegt, werden nachfolgend Methoden zur Komplexitätskostenkalkulation beschrieben, die die vorhandene Komplexität analysieren und berechnen. Zu den bekanntesten Methoden gehören die Variantenkostenrechnung [15], das Ressourcenverfahren [3,19] und die Prozesskostenrechnung [4]. Diese Methoden sind allerdings nur bedingt zur Kostenprognose in der frühen Konzeptphase geeignet, da die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Informationen zum Produkt zur Kostenkalkulation nicht ausreichend sind.

Die *Variantenkostenrechnung* zeichnet sich durch ein lebenszyklusorientiertes Vorgehen zur Bewertung von Produktvarianten aus. Sie beinhaltet die Identifizierung und Berechnung vielfaltsspezifischer Kosten durch die Analyse und Erfassung vielfaltsinduzierter Aktivitäten. Das *Ressourcenverfahren* identifiziert und bewertet die Ressourceninanspruchnahme von Bauteilvarianten. Die Bewertung erfolgt über Kosten- und Verbrauchsfunktionen, die von technischen Produkt- und Prozessmerkmalen abhängen. Einige Autoren sehen in der *Prozesskostenrechnung* die geeignete Methode zur Aufnahme der Komplexitätskosten, da Kostentreiber der Vielfalt auf Prozessebene berücksichtigt und diese differenziert Kostenträgern zugeordnet werden [5]. Aufgrund des sehr hohen Erfassungsaufwandes wird die Prozesskostenrechnung in Unternehmen aber nur selten durchgeführt.

Daneben zeichnet sich das *Durchschnittskostenverfahren* durch seine einfache Handhabung aus und wird daher in Unternehmen häufig angewendet [8]. Das Verfahren berücksichtigt Sachnummernkosten, welche die durchschnittlichen Kosten für die Erstellung, Dokumentation und Pflege einer Komponente über ihre gesamten Lebensphasen darstellen. So können Komplexitätsgestaltungsmaßnahmen in Hinblick auf die Komponentenkommunalität in der Produktentwicklungsphase sichtbar gemacht werden. Im folgenden Kapitel wird das Durchschnittskostenverfahren zur Kostenprognose am Beispiel von Kabelbaumvarianten angewendet.

---

### 3 Kostenprognose am Beispiel des Durchschnittskostenverfahrens

Anhand eines vereinfachten industriellen Praxisbeispiels werden die Kosten für drei Konzepte technischer Lösungen von Kabelbaumvarianten, die mit dem Integrierten PKT-Ansatz entwickelt wurden [7] und sich im Grad ihrer Komponentenkommunalität unterscheiden, prognostiziert. Die Kostenprognose der Konzepte erfolgt mit Hilfe des Durchschnittskostenverfahrens unter Betrachtung der Herstellkosten ( $HK$ ) und der Sachnummernkosten ( $SK$ ).

#### 3.1 Datenaufnahme

Als Daten zur Kostenanalyse müssen neben den Material- und Fertigungseinzelkosten, die entweder aus historischen Daten, aus Angeboten oder durch Schätzungen der Experten im Unternehmen ermittelt werden, auch die prognostizierten Stückzahlen der Komponenten ( $s_{\text{Komp}}$ ) aufgenommen werden. Aus diesen Daten können die Herstellkosten  $HK_i = \sum s_{\text{Komp}} (MEK_{\text{Komp}} + FEK_{\text{Komp}})$  je Konzept  $i$  ermittelt werden. Typische Sachnummernkosten liegen für Kaufkomponenten zwischen 1500-2000 € und für Komponenten in Eigenfertigung zwischen 3000-3500 € [5].

#### 3.2 Durchführung

Aus den im Unternehmen aufgenommenen Daten können die Gesamtkosten  $K$  der entwickelten Konzepte und des aktuellen Standes über den Zusammenhang  $K_i = m_i SK + HK_i$  prognostiziert werden. Die Geradensteigung ergibt sich durch die Anzahl der Komponenten  $m$  je Konzept. Das Ergebnis der Kostenprognose ist in Bild 2 dargestellt.

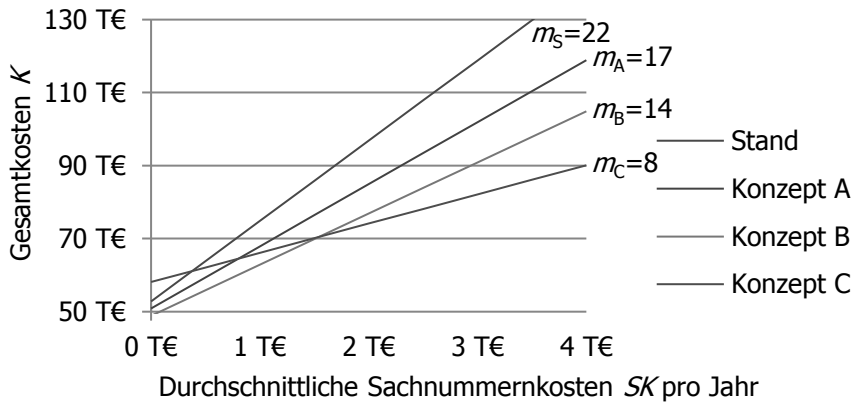


Bild 2: Kostenbewertung am Beispiel von Kabelbaumvarianten [7]

Das Diagramm zeigt die Gesamtkosten der einzelnen Konzepte in Abhängigkeit der Sachnummernkosten. Überschreiten diese 2 T€ ist Konzept C zu wählen, während unterhalb das Konzept B wirtschaftlicher ist.

### 3.3 Erkenntnisse des Praxisbeispiels

Das Praxisbeispiel verdeutlicht, dass eine Abschätzung der Sachnummernkosten durch das Unternehmen die Konzeptauswahl unterstützt und ein erster Schritt der Kostenprognose modularer Produktfamilien in frühen Konzeptphasen ist. Die Anwendung des Durchschnittskostenverfahrens ist einfach und liefert dem Unternehmen neue Erkenntnisse zur optimalen Komponenten- und Variantenvielfalt.

Trotzdem ist das Durchschnittskostenverfahren in vielen Fällen nicht ausreichend, da mehr Effekte durch Komplexität auftreten, die durch durchschnittliche Sachnummernkosten nicht differenziert genug betrachtet werden. So können Fehler in der Kostenprognose von Konzepten entstehen, die zum Beispiel unterschiedliche technische Lösungen verwenden. Folglich bestehen Lücken in der Identifizierung von Komplexitätskostenbestandteilen. Im nächsten Kapitel werden daher detailliert die Komplexitätskosten, die durch Komponenten- und Variantenvielfalt entstehen, beschrieben, um eine Analyse der Komplexitätskostenbestandteile vornehmen zu können.

---

## 4 Kostenprognose über Komplexitätskosteneffekte

Im Folgenden wird ein Ansatz zur Komplexitätskostenprognose beschrieben, der die Auswahl modularer Produktfamilien, wie sie mit dem Integrierten PKT-Ansatz entwickelt werden, in der Konzeptphase unterstützen soll. Dazu werden die Kostenbestandteile der Komplexität der einzelnen Produktlebensphasen, sowie Kenngrößen der Konzepte identifiziert. Mit Hilfe dieser Daten können Komplexitätskostenfunktionen gebildet und deren Auswirkungen unternehmensspezifisch ermittelt werden. So kann eine Prognose der Gesamtkosten der einzelnen Konzepte durchgeführt werden.

### 4.1 Kostenquellen nach Lebensphasen

Im Folgenden werden Kostenquellen, die durch Komplexität in Form von Komponenten- und Variantenvielfalt erzeugt werden, dargestellt.

Im Unternehmen entstehen zusätzliche Kosten durch die Konstruktion neuer Komponenten, die Anpassung der Varianten an technische oder sonstige Änderungen und das Erstellen und Verwalten der technischen Unterlagen. Außerdem ist eine aufwendige Ersatzteilbevorratung und -versorgung notwendig. Daneben entstehen Kosten durch zusätzliche Kundendienstunterlagen, -ausrüstung und -schulungen. Es kommt zu einer Erhöhung des Aufwandes in der Fertigungssteuerung, sowie zu erhöhten Rüstkostenanteilen aufgrund kleinerer Lose und einem höheren Fehleraufkommen. In der Beschaffung entstehen höhere Einstandspreise durch kleinere Stückzahlen. Zusätzlich steigt der Aufwand für die Ausbildung sowie die Ausrüstung des Kundendienstes mit Zunahme der Komponentenvielfalt (vgl. [5,9,11,17,20,22]). Weiterhin kann es zu erhöhten Kosten durch Komponentenvielfalt kommen, da zusätzliche Lieferanten gesucht und ausgewählt werden, sowie mehr Verhandlungsgespräche mit diesen geführt werden müssen. Die Komponentenvielfalt führt zu höheren Lagerbeständen, erhöhtem Planungs- und Steuerungsaufwand in Logistik und Lager, sowie zu einer erhöhten Durchlaufzeit. Der Vertrieb muss einen hohen Fertigbestand zur Aufrechterhaltung der Lieferbereitschaft vorhalten. Außerdem steigen der Aufwand zur Angebotserstellung und die Fehlerhäufigkeit bei der Auftragsbearbeitung. Daneben kommt es durch die erhöhte Komponenten- und Variantenvielfalt zu einem erhöhten Risiko der Reklamation (vgl. [9,17,20]). Darüber hinaus müssen zusätzliche Versuche durchgeführt und Betriebsmittel, Werkzeuge und Vorrichtungen konstruiert werden. Es sind mehr inner- und außerbetriebliche Transportvorgänge notwendig. In der Produktion fällt durch weniger Wiederholungen der Lernkurveneffekt weg und es kommt zu einem erhöhten Aufwand der Materialbedarfsermittlung (vgl. [9,22]).

In der Tabelle 1 sind die erwähnten Kostenquellen, welche den Lebensphasen Produktentwicklung, Beschaffung, Produktion, Vertrieb und Nutzung zugeordnet sind, zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Kostenquellen der Komponenten- und Variantenvielfalt (nach [5,9,11,17,20,22])

PEW	Beschaffung	Produktion	Vertrieb	Nutzung
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Konstruktion neuer Komponenten</li> <li>▪ Anpassung der Varianten an Änderungen</li> <li>▪ Erstellen und Verwalten der technischen Unterlagen</li> <li>▪ Zusätzliche Versuche</li> <li>▪ Aufwand für Betriebsmittel-, Werkzeug- und Vorrichtungskonstruktionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Höhere Einstandspreise durch kleinere Stückzahlen</li> <li>▪ Aufwand Materialbedarfsermittlung</li> <li>▪ Zusätzliche Lieferantensuche/-auswahl</li> <li>▪ Planungs- und Steuerungsaufwand in Logistik/Lager</li> <li>▪ Höhere Lagerbestände</li> <li>▪ Viele inner-/außerbetriebliche Transportvorgänge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erhöhung des Aufwandes in der Fertigungssteuerung/</li> <li>▪ Aufwendigere Auslaufplanung</li> <li>▪ Erhöhte Rüstkostenanteile aufgrund kleinerer Lose</li> <li>▪ Wegfall von Lernkurveneffekten</li> <li>▪ Höheres Fehlerrückkommen</li> <li>▪ Erhöhte Durchlaufzeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bestandsaufbau zur Aufrechterhaltung der Lieferbereitschaft</li> <li>▪ Größerer Aufwand für Ausbildung</li> <li>▪ Aufwendige Angebotserstellung</li> <li>▪ Größere Fehlerhäufigkeit bei Auftragsbearbeitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufwendige Ersatzteilbevorratung/versorgung</li> <li>▪ Zusätzliche Kundendienstunterlagen/ausrüstung/schulung</li> <li>▪ Reklamationsbearbeitung</li> </ul>

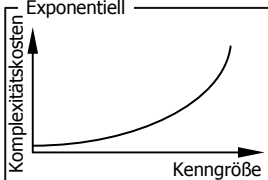
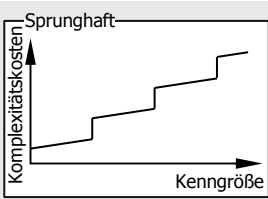
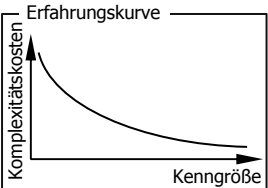
## 4.2 Herleitung von Komplexitätskostenfunktionen

In Tabelle 2 sind drei typische qualitative Verläufe von Komplexitätskosten dargestellt. Der bekannteste Verlauf für Komplexitätskosten steigt exponentiell an [20]. Daneben kann es zu sprunghaften Anstiegen der Kosten durch Zukauf von Ressourcen oder Kapazitäten kommen [17]. Ein klassischer Erfahrungskurvenverlauf zeigt sich in Beschaffung und Produktion [20].

Den in Kapitel 4.1 identifizierten Kostenquellen (z.B. Erhöhter Dokumentationsaufwand) können Kenngrößen (z.B. Anzahl Sachnummern) zugeordnet werden, von denen die Auswirkungen dieser Kostenquellen abhängen. Diese Abhängigkeiten stellen Komplexitätskostenfunktionen dar, welche den typischen Verläufen der Komplexitätskosten zugewiesen werden können (Tabelle 2). Die verwendeten Kenngrößen können sowohl direkte Kenngrößen als auch Komplexitätskenngrößen sein. Die Kostenfunktion *Konstruktion neuer Komponenten* hängt u. a. von der direkten Kenngröße *Anzahl neu zu erstellender Komponenten* ab. Direkte Kenngrößen sind in der frühen Konzeptphase häufig noch nicht bekannt. Daher werden die Kostenfunktionen zusätzlich mit Hilfe der zu diesem Zeitpunkt bekannten Komplexitätskenngrößen wie die

Anzahl der Varianten (AV) und der Komponenten (AK), die Stückzahl der Varianten (StV) und der Komponenten (StK), sowie der Wiederverwendungsgrad (W) (nach [3,5,16,22]) aufgestellt. So hängt die Kostenfunktion *Konstruktion neuer Komponenten* bei Unkenntnis der *Anzahl neu zu erstellender Komponenten* von der Komplexitätskenngröße *Wiederverwendungsgrad* ab. In Verbindung mit dem aktuellen Entwicklungsstand können die direkten Kenngrößen *oder* die Komplexitätskenngrößen verwendet werden.

Tabelle 2: Verläufe der Komplexitätskostenfunktion (nach [17,20])

<p>Exponentiell</p> 	<p><i>Produktentwicklung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Konstruktion neuer Komponenten <math>f(\text{Anz. neue Komp.}), f(1-W)</math></li> <li>▪ Anpassung der Varianten <math>f(\text{Anz. Anpassungen}), f(1-W)</math></li> <li>▪ Dokumentation <math>f(AK)</math></li> <li>▪ Versuche <math>f(\text{Anz. Versuche}), f(AK)</math></li> </ul> <p><i>Beschaffung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lieferantensuche/-auswahl <math>f(\text{Anz. Lieferantengesuche}), f(AK)</math></li> <li>▪ Transportvorgänge <math>f(\text{Anz. Transportvorgänge}), f(AK)</math></li> <li>▪ ...</li> </ul>
<p>Sprunghaft</p> 	<p><i>Beschaffung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lagerbestände <math>f(\text{Lagergröße}), f(AK)</math></li> </ul> <p><i>Vertrieb</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bestandsaufbau Lieferbereitschaft <math>f(AK)</math></li> <li>▪ Ausbildung <math>f(\text{Schulungen}), f(AV)</math></li> </ul> <p><i>Nutzung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ersatzteilbevorratung/-versorgung <math>f(\text{Anz. vorrätiger Ersatzteile}), f(AK)</math></li> <li>▪ ...</li> </ul>
<p>Erfahrungskurve</p> 	<p><i>Beschaffung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einstandspreise <math>f(StK)</math></li> </ul> <p><i>Produktion</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rüstkostenanteile <math>f(StK)</math></li> <li>▪ Lernkurveneffekten <math>f(StK), f(StV)</math></li> <li>▪ ...</li> </ul>

In Relation zu den Kenngrößen können verschiedene modulare Konzepte über die Komplexitätskostenfunktionen verglichen werden. Einzelne Komplexitätskostenbestandteile der unterschiedlichen Konzepte können dabei ohne Quantifizierung der Kostenfunktionen im direkten Vergleich bewertet werden. Für die Betrachtung mehrerer Komplexitätskostenbestandteile und deren Wechselwirkungen sind jedoch die explizite Berechnung der Komplexitätskosten oder zumindest deren Größenordnungen notwendig.

### 4.3 Berechnung der Komplexitätskosten

Zur Berechnung der Komplexitätskosten werden die relevanten Komplexitätskostenbestandteile identifiziert, deren Kostenfunktionen bestimmt und in

---

Abhängigkeit der Kenngrößen für jedes Konzept addiert. Für eine Kostenprognose zur Unterstützung der Konzeptauswahl modularer Produktfamilien werden die Gesamtkosten der Konzepte aus den Herstellkosten und Komplexitätskosten gebildet. So kann entschieden werden, ab wann sich eine höhere Modularität gegenüber nicht modularen Konzepten lohnt.

Wie groß die Auswirkungen der Komplexitätskosten in den einzelnen Lebensphasen sind, ist unternehmensspezifisch zu untersuchen. Am Beispiel von Automobilherstellern konnte aufgezeigt werden, dass 15-20 % der Gesamtkosten durch Produktkomplexität aufgrund der Varianten- und Komponentenvielfalt entstehen. Davon befinden sich die größten Anteile in Produktentwicklung (15-40 %) und Produktion (30-60 %) [3,18].

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung modularer Produktfamilien stellt eine Möglichkeit zur Reduzierung der Gesamtkosten eines Produktes dar. Kostenprognosen in frühen Phasen der Produktentwicklung unterstützen die Konzeptentwicklung und -auswahl modularer Produktstrukturen. Im Beitrag wurde zunächst eine Fallstudie zur Kostenprognose am Beispiel von Kabelbaumvarianten gezeigt. Aufbauend auf den daraus gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Ansatz zur Kostenprognose über die Identifikation und Bestimmung der Auswirkungen der Komplexitätskostenbestandteile vorgestellt. Dieser Ansatz stellt eine Erweiterung des Integrierten PKT-Ansatzes zur Entwicklung modularer Produktfamilien dar.

Inhalt zukünftiger Forschungsarbeit ist die Anwendung des Ansatzes zur Kostenprognose modularer Produktfamilien in unterschiedlichen Unternehmenstypen und -situationen. Dabei ist vor allem zu prüfen, ob die in der Literatur beschriebenen Kostenquellen, die aufgezeigten Kenngrößen sowie die aufgestellten Komplexitätskostenfunktionen bestätigt werden können oder erweitert werden müssen. Ferner ist der Zusammenhang des Einflusses der Komplexität durch weitere Eigenschaften der Modularität, sowie durch verschiedene Organisations- oder Prozessformen auf die Kosten zu untersuchen. Nach der Komplexitätskostenanalyse sollen Ansätze zur Kostenbewertung und -beeinflussung aus den gewonnenen Informationen entwickelt werden.

---

## Literatur

- [1] Blee, C.: "Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien", Dissertation, TuTech Verlag, Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Band 3, Hamburg, 2011.
- [2] Brosch, M.; Beckmann, G.; Krause, D.: "Towards an Integration of Supply Chain Requirements into the Product Development Process", in: proceedings of 12th International Design Conference - Design 2012, Dubrovnik, pp. 23-32, 2012.
- [3] Caesar, C.: "Kostenorientierte Gestaltungsmethodik für variantenreiche Serienprodukte", Diss. RWTH Aachen, VDI Verlag, Düsseldorf, 1991.
- [4] Cooper, R.: "Predevelopment Activities Determine New Product Success", in: Industrial Marketing Management, Nr. 17, S. 237-247, 1988.
- [5] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: "Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung", 6. Auflage, Springer, Heidelberg, 2007.
- [6] Eilmus, S., Gebhardt, N., Rettberg, R.; Krause, D.: "Evaluating a methodical approach for developing modular product families in industrial case studies", 12th International Design Conference - Design 2012, pp. 837-846. Dubrovnik, 2012.
- [7] Eilmus, S.; Ripperda, S.; Krause, D.: "Towards the Development of commonal Product Programs", akzeptiert für ICED 2013, unveröffentlicht, 2013.
- [8] Hichert, R.: "Probleme der Vielfalt", Teil 2, in: wt Zeitschrift für industrielle Fertigung, S. 141-145, 1986.
- [9] Jeschke, A.: "Beitrag zur wirtschaftlichen Bewertung von Standardisierungsmaßnahmen in der Einzel- und Kleinserienfertigung durch die Konstruktion", Dissertation, Braunschweig, 1996.
- [10] Kipp, T.: "Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung", Dissertation, TuTech Verlag, Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Band 4, Hamburg, 2012.

- 
- [11] Kohlhase, N.: "Variantenreduzierung in der Praxis – ein Erfahrungsbericht aus der Einzel- und Kleinserienfertigung", in: VDI Berichte Nr. 1434, S. 53-68, 1998.
- [12] Krause, D.; Eilmus, S.: "A Methodical Approach for Developing Modular Product Families", in: proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design - ICED 11, Copenhagen, pp. 299-308, 2011.
- [13] Krause, D.; Ripperda, S.: "An Assessment of Methodical Approaches to Support the Development of Modular Product Families", akzeptiert für ICED 2013, unveröffentlicht, 2013.
- [14] Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M.F.: "Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion", Springer, Berlin, 2006.
- [15] Pfeiffer, W.; Dörrie, U.; Gerharz, A.; Goetze, S. v.: "Variantenkostenrechnung", in: Handbuch Kostenrechnung, Hrsg. v. W. Mannel, Wiesbaden, 1992.
- [16] Rapp, T.: "Produktstrukturierung", Dissertation, Gabler, Wiesbaden, 1999.
- [17] Rathnow, P.J.: "Integriertes Variantenmanagement", Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1993.
- [18] Rommel, G.; et al.: "Einfach Überlegen", Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1993.
- [19] Schuh, G.: "Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten – Ein Beitrag zur systematischen Planung von Serienprodukten", Dissertation, Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 2, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [20] Schulte, C.: "Effektives Kostenmanagement", Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1992.
- [21] Thonemann, U.W.; Brandeau, M.L.: "Optimal Commonality in Component Design", in: Operations Research, Vol. 48, No. 1, pp. 1-19, 2000.
- [22] Zich, C.: "Integrierte Typen- und Teileoptimierung", Dissertation, Gabler, Wiesbaden, 1996.

# Referenzmodell zur Analyse von Baukastensystematiken in der Nutzfahrzeugindustrie

B. Braun, M. Kissel, A. Förg, M. Kreimeyer  
*Lehrstuhl für Produktentwicklung Technische Universität München*  
*Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik MAN Truck & Bus AG*

## 1 Einleitung

Die Vielzahl und Heterogenität an Kundenwünschen führt zu einer gesteigerten Produktvielfalt und somit zu einer Steigerung der unternehmensinternen Komplexität entlang der Wertschöpfungskette [1]. Die Entwicklung intelligent strukturierter Baukastensysteme bietet die Möglichkeit, bei gleichzeitiger Erfüllung der marktseitig geforderten Anforderungen Kommunalitäten zwischen Produkten, Produktfamilien sowie Produktgenerationen zu schaffen und Skaleneffekte entlang der Wertschöpfungskette zu erzielen [2]. Auch die Reduktion von Einmalaufwänden, die Flexibilisierung der Produktion und die Steigerung der Entwicklungsqualität durch Nutzung bewährter Umfänge tragen zum Erfolg von Baukastensystemen bei. Unter dem Begriff Baukastensystematik versteht man neben der Struktur und dem Inhalt des Baukastensystems selbst die organisatorische und prozessuale Einbettung innerhalb eines Unternehmens.

Ziel dieses Beitrags ist es, eine Methode zur Analyse unternehmensspezifischer Baukastensystematik aufzuzeigen und die Ergebnisse anhand eines Referenzmodells basierend auf dem Stand-der-Technik zu spiegeln, um somit Verbesserungspotentiale für das Unternehmen herauszuarbeiten. Eine entsprechende Methodik dieser Art findet sich bislang noch nicht in der Literatur. Nach einer einleitenden Begriffsdefinition wird die Methodik zur Analyse von Baukastensystematiken vorgestellt. Im Rahmen einer Fallstudie wird anschließend die entwickelte Methodik am Beispiel eines Unternehmens aus der Nutzfahrzeugindustrie dargestellt.

fahrzeugindustrie angewendet. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick für weitere Untersuchungen.

## 2 Stand der Technik

In der Literatur existieren zahlreiche Definitionen für den Begriff Baukasten, die grundsätzlich sehr ähnlich sind und nur unterschiedliche Akzentuierungen verwenden (vgl. [3]). Baumgart definiert in Anlehnung an Biegert, Jeschke, Kohlhase und Pahl et al. ein Baukastensystem als eine „Menge von Bausteinen, die spezifisch ausgewählt und unter Beachtung von Verträglichkeiten miteinander kombiniert werden, um in einem begrenzten Anwendungsbereich Baukastenprodukte zu konfigurieren“ [4]. Dabei sind Bausteine als Objekte des Baukastensystems vorausgedachte technische Lösungen, die unterschiedliche Funktionen und Eigenschaften realisieren. Die Bausteine eines Baukastensystems werden in der Literatur nach vielfältigen Kriterien strukturiert (siehe Tabelle 1). Bauteile, die Baukastenkonstruktionen dort vervollständigen, wo aus technischen und wirtschaftlichen Gründen eine Verwendung von Bausteinen nicht möglich ist, nennt man Nicht-Bausteine [5].

Tabelle 1: Kriterien zur Klassifikation von Bausteinen in der Literatur

Kriterium	Definition	Ausprägungen	Autoren
<b>Bedeutung</b>	Notwendigkeit eines Bausteins innerhalb der Baukastenproduktvarianten	Muss- und Kann-Bausteine	[6], [7], [5]
<b>Varianz</b>	Existenz von Varianten zu den Bausteinen oder Vorkommen der Bausteine nur in einer einzelnen Ausführung	Substitutionale und nicht substitutionale Bausteine	[8]
<b>Konfiguration</b>	Hierarchieebene eines Bausteines bei Verflechtung von Baukästen unterschiedlicher Ordnungen	Elementare und konfigurierte Bausteine	[7]
<b>Funktion</b>	Zu erfüllende Teilfunktion eines Bausteines zur Realisierung einer Gesamtfunktion	Grund-, Sonder-, und Anpassbausteine	[6], [5]
<b>Kosten</b>	Berücksichtigung der Kosten eines Bausteins	A-, B-, C-Bausteine	[9]

Des Weiteren existieren in der Literatur zahlreiche Vorschläge zur Klassifikation von Baukastensystemen (siehe Tabelle 2). Während bei vorhandenen Systemen diese zur Beschreibung des Systems dienen, werden sie bei Neuentwicklungen als strategische Zielvorgabe verwendet [7].

Um ein detailliertes Verständnis einer Baukastensystematik eines Unternehmens aufzubauen und dieses gegebenenfalls mit dem von anderen Unternehmen zu vergleichen, benötigt man einen Ansatz, der über die Klassifikation von Bausteinen und Baukastensystemen hinausgeht. Vielmehr bedarf es einer übergreifenden Analysemethodik, die die Einbettung eines Baukastensystems in den Gesamtkontext eines Unternehmens (Strategie, Prozesse, Organisation) ermöglicht. Ziel dieses Beitrags ist eine derartige Methodik zu entwickeln und diese beispielhaft anhand eines Unternehmens aus der Nutzfahrzeugindustrie im Rahmen eines Fallbeispiels zu validieren.

Tabelle 2: Kriterien zur Klassifikation von Baukastensystemen in der Literatur

Kriterium	Ausprägungen	Autoren
<b>Systemabgrenzung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geschlossener Baukasten mit Bauprogramm</li> <li>▪ Offener Baukasten mit Baumusterplan</li> </ul>	[10], [11]
<b>Reinheit des Baukastensystems</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reines Baukastensystem</li> <li>▪ Mischsystem mit serienmäßiger Verwendung von Nicht-Bausteinen</li> <li>▪ Mischsysteme mit kundenspezifischer Neukonstruktion von Nicht-Bausteinen</li> </ul>	[8], [7]
<b>Verflechtung von Baukastensystemen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unverflochtenes Baukastensystem</li> <li>▪ Horizontal verflochtenes Baukastensystem</li> <li>▪ Vertikal verflochtenes Baukastensystem</li> </ul>	[8], [12]
<b>Hierarchieebenen eines Baukastensystems</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Produktbaukasten</li> <li>▪ Teilbaukasten</li> </ul>	[13]
<b>Abgrenzung nach der Produktstruktur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Physikalische Plattform</li> <li>▪ Plattform mit Modulvarianten</li> <li>▪ Modulbaukasten mit fixer Struktur</li> <li>▪ Freie Modularisierung</li> </ul>	[14]

### 3 Methodik

Das Forschungsprojekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Nutzfahrzeughersteller MAN Truck & Bus AG (nachfolgend „MTB“) durchgeführt. Um die notwendige Datengrundlage zu erhalten und die Validität der Ergebnisse sicherzustellen, wurde die Methode der Aktionsforschung herangezogen. Da zu Beginn der Analyse Informationen über die Baukastensystematik im Unternehmen nur eingeschränkt vorlagen, wurden unternehmensinterne Dokumentationen verwendet, mit Literaturquellen gespiegelt und Experteninterviews durchgeführt. Es wurden 20 Experten aus den Bereichen Entwicklung (Konstruktion, Stückliste und Architektur), Produktmanagement und Vertrieb befragt. Die Auswahl der Interviewpartner erfolgte aufgrund ihrer jeweiligen Aufgabenbereiche auf Basis von persönlichen Empfehlungen. Basierend auf

diesen Datenquellen wurde ein gemeinsames Verständnis der Baukastensystematik entwickelt und die Zwischenergebnisse mit den Ansprechpartnern phasenweise diskutiert, evaluiert und verbessert.

Mit dem Ziel einer kontextorientierten Analyse der Baukastensystematik eines Unternehmens gliederte sich das Forschungsvorgehen in die vier Phasen Vorbereitung, Analyse, Vergleich und Auswertung (vgl. Bild 1). Zu Beginn werden in der **Vorbereitungsphase** die Ziele und Rahmenbedingungen der Analyse identifiziert. Die Motivatoren, die zu einer bestimmten Baukastensystematik führen, können in Unternehmen sehr unterschiedlich gewichtet sein. Während es in dem einen Betrieb z.B. vorrangig um die Erzielung von Skaleneffekten geht, liegt in dem anderen Betrieb der Schwerpunkt auf einer optimalen Konfigurierbarkeit.

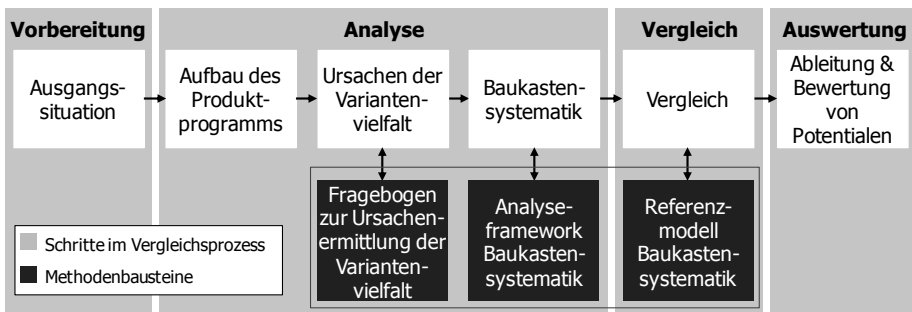


Bild 1: Methodik zur Analyse von Baukastensystematiken

Innerhalb der **Analysephase** werden daher neben der Betrachtung der Baukastensystematik selbst die kausalen Zusammenhänge zwischen der Variantentstehung und -beherrschung analysiert. Dazu wird einerseits der Aufbau des Produktportfolios und somit die externe Variantenvielfalt ermittelt, andererseits werden die branchen- und unternehmensspezifischen Ursachen der Variantenvielfalt erfragt. Zudem wird die eigentliche Baukastensystematik zur Beherrschung dieser Vielfalt betrachtet. Die Methodenbausteine Fragebogen und Analyseframework unterstützen bei der Detaillierung des Unternehmenskontextes und geben Aufschluss über kausale Zusammenhänge.

Mit einem **Fragebogen** wurden sowohl die externen Herausforderungen als auch die internen Ursachen der Variantenvielfalt des Unternehmens ermittelt. Um die wesentlichen Ursachen zu identifizieren, wurden zu Beginn typische Gründe für die Entstehung der Variantenvielfalt in produzierenden Unternehmen aus der Literatur zusammengetragen und in Cluster unterteilt (vgl.

Bild 2). In der vorliegenden Fallstudie wurde der quantitative Fragebogen von sieben Experten beantwortet und ausgewertet.

<i>Kategorie</i>	<i>Cluster</i>	<i>Subcluster</i>	<i>Variantentreiber</i>
Unternehmens-externe Ursachen	Kunden	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kunden</li> <li>▪ Gesellschaft</li> </ul>	<b>45 Ursachen der Variantenvielfalt</b>
	Markt und Wettbewerber	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Internationalisierung der Märkte</li> <li>▪ Marktkomplexität und Wettbewerber</li> </ul>	
	Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Normen und Gesetze</li> <li>▪ Regulierungen</li> <li>▪ Technologische Entwicklung</li> </ul>	
Unternehmens-interne Ursachen	Unternehmensstrategie	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Defizite in der Unternehmensstrategie</li> <li>▪ Gezielte strategische Ausrichtung</li> </ul>	
	Finanzen und Controlling	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wirtschaftl. Unternehmenssituation</li> <li>▪ Transparenz der Erlösstruktur</li> </ul>	
	Organisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Organisatorische Defizite</li> </ul>	
	Übergeordnete unternehmensinterne Ursachen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Methodische Defizite</li> <li>▪ Transparenz- &amp; Informationsdefizite</li> <li>▪ Gestaltungsregeldefizite</li> <li>▪ Zeitproblematik</li> </ul>	

Bild 2: Mögliche Ursachen der Variantenvielfalt

Zweck des **Analyseframeworks zur Baukastensystematik** ist die Baukastensystematik innerhalb der Unternehmen zu untersuchen und dabei eine strukturierte und vollständige Datenerhebung sicherzustellen. Zu jedem Themenbereich (vgl. Bild 3) wurden Stichpunkte formuliert, anhand derer die Analyse innerhalb des Unternehmens strukturiert durchgeführt wurde.

<b>Historie und Baukastenstrategie</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Historische Entwicklung der Baukastensystematik</li> <li>▪ Motivatoren und Ziele der Baukastenstrategie</li> </ul>		
<b>Verständnis und Systematik des Baukastensystems</b>	<b>Architekturregeln im Baukasten</b>	<b>Prozesse, Organisation und Dokumentation</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verständnis des Begriffes Baukasten</li> <li>▪ Abgrenzung verwandter Begriffe (z.B. Modul, Plattform, Architektur)</li> <li>▪ Hierarchieebenen des Baukastens</li> <li>▪ Baukastenstruktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Architekturmerkmale</li> <li>▪ Architekturmaße</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Architekturprozesse</li> <li>▪ Schnittstelle zum Fahrzeug-PEP</li> <li>▪ Schnittstelle zum Innovationsprozess</li> <li>▪ Änderungsmanagement des Baukastens und der Module</li> <li>▪ Organisation/Gremien</li> <li>▪ Baukastendokumentation</li> <li>▪ Stücklistendokumentation</li> </ul>

Bild 3: Framework zur Analyse der Baukastensystematik

---

Um die Baukastensystematik innerhalb eines Unternehmens zu verstehen, ist es notwendig, sowohl die **historische Entwicklung** als auch die **strategische Zielsetzung** zu betrachten. Erst nachdem die Hintergründe einer Baukastensystematik bekannt sind, kann die eigentliche Systematik vollständig erfasst und verstanden werden. Daher wird die Betrachtung der historischen Entwicklung sowie der Ziele der Baukastenstrategie an den Beginn des Frameworks gesetzt. Um ein **Verständnis der Baukastensystematik** aufzubauen, wird eine unternehmenseigene Definition des Begriffes Baukasten und die Abgrenzung zu verwandten Termini, wie beispielsweise Module, Plattform und Architektur, abgefragt. Ferner ist es notwendig, die Hierarchieebenen und die Struktur des Baukastens zu ermitteln. Eine Baukastenstruktur beschreibt die Struktur der Bestandsbeziehungen zwischen Bausteinen und Baukastenprodukten, definiert deren Konfigurationen und legt die Produktstruktur fest. Sie ist polyhierarchisch aufgebaut und bildet eine Generik über alle Baukastenprodukte. Ziel hierbei ist, die inhaltlich-logische Umsetzung der Baukastensystematik im Unternehmen zu verstehen. Die **Architekturregeln** eines Baukastens ermöglichen die gemeinsame Verwendung und den übergreifenden Einsatz von Bausteinen. Dabei handelt es sich um Architekturmerkmale (z.B. Schnittstellendefinitionen, Bausteinlagen, Gewichtsvorgaben) sowie Architekturmaße (z.B. skalierte Bauräume, Kettenmaße). Sie bilden einen wesentlichen Bestandteil eines Baukastensystems und geben Aufschluss über dessen technische Umsetzung. Um die prozessuale Umsetzung einer Baukastensystematik innerhalb eines Unternehmens zu verstehen, müssen die **Prozesse, die Organisation und die Dokumentation** eines Baukastens und baukastennaher Themen betrachtet werden. Dabei handelt es sich meist um vertrauliche unternehmensinterne Informationen, die nur teilweise zugänglich sind.

Der Analysephase folgt der **Vergleich mit einem Referenzmodell**, das aus dem Stand der Technik (vgl. Kapitel 2) abgeleitet wurde. Die unternehmensspezifischen Baukastensystematiken und heterogenen Begriffsdefinitionen erfordern die Einführung eines solchen Referenzmodells. Hierdurch kann ein einheitliches Bild generiert und Systematiken richtig eingeordnet werden. Das Baukasten-Referenzmodell bildet eine einheitliche und aufeinander abgestimmte Struktur zum Vergleich und zur Bewertung von Baukastensystematiken, ähnlich dem CMMI- oder SPICE-Referenzmodell [15]. Es bildet die Vergleichskategorien Begriffe, betriebliche Voraussetzungen, Bausteinarten, Klassifizierung des Baukastensystems, Stakeholder des Baukastens und Vorgehensweise bei der Baukastenentwicklung.

Anhand der Ergebnisse der Analysephase und der Einordnung der Ergebnisse in ein Referenzmodell werden in der abschließenden **Auswertungs-**

---

**phase** Potentiale und Handlungsfelder des Unternehmens abgeleitet und bewertet. Diese bilden Ansatzpunkte für konkrete Maßnahmen, die im Unternehmen umgesetzt werden können. Die umfassende Betrachtung der Baukastensystematik und deren Unternehmenskontext lässt es zu, neben symptomatischen Verbesserungen auch ursächliche Maßnahmen zu definieren.

#### 4 Fallbeispiel Analyse der Baukastensystematik

In Anwendung der vorgestellten Methodik wird im Folgenden die Baukastensystematik der MTB analysiert und am entwickelten Referenzmodell gespiegelt. Einer Vorstellung des Produktportfolios und der Ursachen der Variantenvielfalt folgt eine Auseinandersetzung mit dem unternehmensindividuellen Baukastenverständnis und der darin begriffenen Baukastensystematik mit deren Bausteinklassifikation.

Der Nutzfahrzeughersteller MTB ist als kundenorientierter Anbieter eines breiten Produktsortiments aufgestellt. Unternehmensprozesse sind auf die Darstellung eines hochvarianten Produktportfolios mit hoher Ausstattungs- und Konfigurationsvarianz ausgerichtet: eine Vielzahl von technischen Lösungsbausteinen müssen effizient entwickelt und auftragsspezifisch – unter Beachtung von vertrieblichen und technischen Verträglichkeiten – zu stimmigen Gesamtfahrzeugkonzepten konfiguriert werden. In Bezug auf den Geschäftsbereich Lkw wird das Serienportfolio hierarchisch in Baureihen, Fahrzeugtypen, Grundfahrzeugfamilien und auf unterster Ebene in Grundfahrzeuge strukturiert, welche den Aufsetzpunkt für kundenindividuelle Konfigurationsoptionen und die Auswahl von Ausstattungsfeatures darstellen. Aus 11 definierenden Merkmalen, deren Ausprägungen und ihrer zulässigen Kombinatorik ergeben sich ca. 15.000 unterschiedliche Grundfahrzeuge [16].

Die hohe externe und interne Variantenvielfalt (Anzahl Grundfahrzeuge, Ausstattungsvarianten) führt zu vergleichsweise geringen Stückzahlen pro Variante, weshalb eine kommunalitätsorientierte Entwicklungssystematik – mit Berücksichtigung der spezifischen Variantentreiber – für den OEM von zentraler Bedeutung ist. Die Erfassung branchen- und unternehmensspezifischer Ursachen und Treiber der Variantenvielfalt erfolgt mit Hilfe des vorgestellten Fragebogens und Experteninterviews mit Differenzierung zwischen externen (Kunden, Märkte) und internen Ursachen (Unternehmensstrategie, Organisation). Bei den externen Treibern stehen die zunehmende Spreizung von individuellen Kundenwünschen, zunehmende Anforderungen und Regularien im Kontext weltweiter Absatzmärkte (Homologation) und die sich sukzessive verschärfenden gesetzlichen Emissionsstandards im Zentrum. Als interne Ursachen können der strategische Fokus auf ein hochgradig kundenindividuel-

les Produktspektrum, resultierende prozessuale Herausforderungen bei der Variantenplanung/-bewertung sowie die Zeitkritikalität vieler Projekte im Kontext sich verkürzender Entwicklungszyklen und Diversifikation der Absatzmärkte identifiziert werden.

Zur Begegnung dieser Treiber der Variantenvielfalt unterstützt die MTB Baukastensystematik die effiziente Darstellung dieser hohen Varianz und Konfigurationsflexibilität für die branchentypisch kontrastierend geringen Stückzahlen pro Variante (vgl. Bild 4). MTB versteht den Baukasten als Ordnungssystem über alle enthaltenen Bausteine, die konfigurationsabhängige Gültigkeiten erhalten. Die Strukturierung erfolgt zweistufig in Form des übergreifenden Fahrzeugbaukastens (stücklistenbasierte Auswahlregeln für Komponentenvarianten) und mehrerer untergeordneter Technikbaukästen (fachbereichsspezifische Konstruktionssystematik) [17].

<b>Historie &amp; Baukastenstrategie</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unternehmensstrategie: Vollsortimenter</li> <li>▪ Ziel: ~ 15.000 Grundfzg. (= fahrfähiges Basisfzg.) plus Konfigurations-/Ausstattungsvarianz</li> </ul>		
<b>Verständnis &amp; Systematik des Baukastensystems</b>	<b>Architekturregeln im Baukasten</b>	<b>Steuerung des Baukastensystems</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Baukastensystem als das Ordnungssystem über Bauteilumfängen</li> <li>▪ Zwei Baukastenebenen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Keine unternehmensweiten Architekturregeln</li> <li>▪ Nur fachbereichsinterne Regeln in der Entwicklung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dokumentation und Konfiguration des Baukastens durch die Baukastenstücklisten</li> </ul>

Bild 4: MTB-Baukastensystematiken anhand des Frameworks

Über gesetzliche Anforderungen hinaus, sind Architekturregeln bei MTB nur punktuell unternehmensweit formalisiert. Sie bestehen jedoch implizit in den komponentenverantwortlichen Fachabteilungen. Über Architekturstandards wie die Festlegung eines durchgängigen Leiterrahmenkonzepts mit Standardisierung von Querträgeranordnung und Bohrraster wird die Basis für die erforderliche Konfigurationsflexibilität geschaffen. Die Bausteine der Fahrzeug- und Technikbaukästen, deren Zusammensetzung sowie Kombinatorik sind zur Steuerung vollständig in einer vollumfänglichen Stückliste abgebildet.

Auf die Analyse der prinzipiellen Entwicklungssystematik und deren historischen Kontext mit Hilfe der Experteninterviews kann eine profundere Charakterisierung durch den Vergleich mit dem entwickelten Referenzmodell erfolgen. Dies erfolgt in Bezug auf das unternehmensspezifische Baukastenverständnis (Tabelle 3), die Klassifikation der enthaltenen Bausteine (Tabelle 4) sowie die charakterisierenden Merkmale der Baukastensystematik (Tabelle 5).

Zur Charakterisierung des Baukastenverständnisses werden die im Referenzmodell aufgeführten Entitäten eines generischen Baukastensystems für den MTB Fahrzeug- und Technikbaukasten beschrieben (siehe Tabelle 3). Die Klassifikation der Bausteine kann gemäß der einschlägigen Literatur (vgl. Tabelle 1) hinsichtlich der Merkmale in Tabelle 4 erfolgen.

Tabelle 3: Baukastenverständnis bei MTB anhand des Referenzmodells

Aufbau eines Baukastensystems	Fahrzeugbaukasten	Technikbaukasten
Vorgaben bzgl. Verwendung: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Produktvarianten</li> <li>▪ Produkteigenschaften</li> <li>▪ Lebenszyklus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ermittlung von abzubildenden Komponentenvarianten und deren Anforderungen durch Vorgabe von Merkmalen und deren Kombinatorik im Lastenheft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Herunterbrechen der Anforderungen an die Technikbaukästen anhand von Vorgaben des Fahrzeugbaukastens</li> </ul>
Vorgaben bzgl. Architektur <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Architekturregeln</li> <li>▪ Baukastenstruktur</li> <li>▪ Kombinationsregeln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nur punktuelle unternehmensweite Architekturvorgaben</li> <li>▪ Vorgabe der Baukastenstruktur durch tiefste Ebene einer definierten Produktgliederung</li> <li>▪ Verregelung der Bausteine in der Stückliste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vor allem fachbereichsinterne Architekturregeln</li> <li>▪ Keine formale Ordnungsstruktur der Technikbaukästen</li> <li>▪ Verregelung in der Stückliste über Bausteine des Fahrzeugbaukastens</li> </ul>
Bausteine <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standardisierte Bausteine</li> <li>▪ Derivatspezifische Bausteine</li> <li>▪ Nicht-Bausteine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fahrzeug besteht zu 100% aus Bausteinen</li> <li>▪ Keine Nicht-Bausteine (d.h. jedes Fahrzeug besteht zu 100% aus den Bausteinen des Fahrzeugbaukastens.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ bereichsspezifisch ausgeprägt</li> </ul>

Tabelle 4: Bausteinklassifikation bei MTB anhand des Referenzmodells

Bausteinklassifikation	Fahrzeugbaukasten	Technikbaukasten
<b>Bausteine (BS)</b>	Komponentenvariante bzw. Verkaufsgruppe	Einbau, Zusammenbau, Modul, Baugruppe, Einzelteil
Muss- & Kann-BS	BS sind in MUSS- und KANN-BS im Fahrzeugbaukasten unterteilt	aufgrund uneinheitlicher Ordnungsstruktur nur über Fahrzeugbaukasten ausgeprägt
Substitutionale & nicht-substitutionale BS	BS sind nach Funktionsähnlichkeit systematisiert; Substitution für ausgewählte Umfänge gemäß Regelwerk möglich	
Elementare & konfigurierte BS	Sowohl elementare als auch konfigurierte BS (konfigurierte BS als Produkte eines Technikbaukastens)	

Tabelle 5: Baukastensystematik bei MTB anhand des Referenzmodells

<b>Baukastensystematik</b>	<b>Fahrzeugbaukasten</b>	<b>Technikbaukasten</b>
<b>Systemabgrenzung</b>	Geschlossener Baukasten	Geschlossener Baukasten
<b>Reinheit</b>	Reines System	Reines System
<b>Verflechtung</b>	nimmt Bestandteile des Technikbaukastens auf	formal über in Stückliste abgebildeten Fahrzeugbaukasten strukturiert
<b>Hierarchieebenen</b>	Produktbaukasten	Teilbaukasten
<b>Produktstruktur</b>	Mischform aus Entitäten des Referenzmodells	
<b>Kundenintegration</b>	Integration des Kunden in die Bausteinkonfiguration	Keine Kundenintegration

Abschließend enthält das Referenzmodell charakterisierende Merkmale für Baukastensystematiken des Standes der Technik (vgl. Kapitel 2), an denen wiederum sowohl der MTB Fahrzeug- als auch Technikbaukasten gespiegelt werden können (siehe Tabelle 5).

## 5 Diskussion und Ausblick

Ein zentrales Element der Untersuchung war es, ein Verständnis des Themas „Baukasten“ zu schaffen; da sich in diesem Begriff die Dokumentationsphilosophie eines Unternehmens maßgeblich widerspiegelt, ist eine detaillierte Begriffsklärung ein elementarer Schritt in der Vereinheitlichung und formalen Verankerung einer solchen Methode. Gerade die Begriffe (und Konzepte) zu „Baukasten“, „Baustein“, „Modul“ und „Modularisierung“ stehen im Zentrum einer solchen Betrachtung. Aus industrieller Perspektive liegt hier noch keine zentrale und wissenschaftlich breit anerkannte Begriffsklärung vor. In der industriellen Reflexion kommt es zu einer Reihe von Erkenntnissen:

- Eine Ausgewogenheit zwischen Standards bzw. Leitplanken der Architektur und den Bausteinen des Baukastens ist notwendig, um die Stabilität des Baukastens über lange Zeit zu gewährleisten; diese müssen einer zentral verankerten Steuerung unterliegen
- Eine Baukasten-orientierte Produktstrukturlogik unterstützt dabei, den Transfer zwischen Dokumentationssystematiken zu erleichtern; insbesondere die Repräsentation der Bausteine in der Entwicklungsdokumentation ist notwendig, um auch im Kontext kleiner Änderungen die Baukastensystematik unbemerkt zu verändern

- 
- Die Abbildung des Baukastens in den IT-Systemen (insbesondere der Stückliste) reduziert Pflegeaufwände und Nutzbarkeit; sie allein kann aber eine klare Gremiensteuerung der Baukastenumfänge nicht ersetzen
  - Je nach Stückzahlen- und Geschäftsmodell macht ein variabler Baukastenanteil Sinn; geringe Stückzahlen und hohe mögliche Kommunalitäten im Produkt bedingen, dass ein Aufbau des Produkts als vollständiger Baukasten mehr Sinn macht als bei vergleichsweise monolithischen Produkten; entsprechend gibt es im Nutzfahrzeug-Bereich wenig Äquivalente einer „Plattform“, die eine gleiche Basis über mehrere topologisch ähnliche Produkte bildet

Aus wissenschaftlicher Sicht bestätigt sich – auf übergeordneter Ebene – der Wert von Baukasten-orientierter Entwicklung. Dabei ist die jeweilige Zielstellung, die mit dem Baukasten bedient werden soll von hoher Bedeutung: Während die Reduktion von Einmalaufwänden im Mittelpunkt der NFZ-Entwicklung steht (aufgrund geringer Stückzahlen im Markt), sind die Flexibilisierung und das Heben von Skaleneffekte in anderen Bereichen stärker ausgeprägt. Beiden gemein ist die Stärkung von Entwicklungsqualität. Gerade im Falle MTB ist die auf Kundenwünsche fokussierte Komplexitätshandhabung innerhalb eines sehr breiten Produktportfolios ein zentraler Treiber [18].

Im Kontext der industriellen Anwendung hat sich die Methode bewährt; die Ergebnisse wurden auf verschiedenen Management-Ebenen (Entwicklungsvorstand, Top-Management, Fachabteilungen) diskutiert und als sachlich richtig bestätigt. Während die Methode im Kern nur eine vergleichsweise einfache Taxonomie als Referenzmodell darstellt, hilft dieses, einen Rahmen für eine Analyse zu schaffen und Wesentliches von Unwesentlichem zu trennen. Eine Verfeinerung auf Basis von wissenschaftlichen „Best Practices“ und eine Schärfung der dem Referenzmodell zugrunde liegenden Definitionen und Beschreibungen wären eine wertvolle nächste Ausbaustufe.

Der vorgestellte Ansatz kann bei den genannten Aspekten eine zentrale Hilfestellung bieten, da er auf generischer Ebene einen Rahmen vorgibt, innerhalb dessen die einzelnen Fragestellungen bewertet und/oder verglichen werden können. Auch wenn er vor dem Hintergrund der Fahrzeugindustrie entworfen wurde, ist eine breitere Anwendung in anderen Industrien denkbar, da spezifische Fachaspekte nicht Teil der Methodik sind.

---

## References

- [1] Franke, H.-J. et al.: "Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung", Carl Hanser Verlag, München, 2002.
- [2] Schuh, G.: "Innovationsmanagement: Handbuch Produktion und Management 3", 2nd ed., Springer Verlag, Berlin, 2012.
- [3] Braun, B.: "Branchenübergreifende Analyse und Vergleich der Baukastensystematiken in der Automobil- und Nutzfahrzeugentwicklung", Diplomarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2013.
- [4] Baumgart, I. M.: "Modularisierung von Produkten im Anlagenbau", Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2005.
- [5] Pahl, G; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [6] Ehrlenspiel, K.: "Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit", 4th ed., Carl Hanser Verlag, München, 2009.
- [7] Kohlhase, N.: "Strukturieren und Beurteilen von Baukastensystemen: Strategien, Methoden, Instrumente", VDI Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [8] Biegert, H.: "Die Baukastenbauweise als technisches und wirtschaftliches Gestaltungsprinzip", Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe, Karlsruhe, 1971.
- [9] Hansen, C. L.; Mortensen, N. H.; Hvam, L.: "Calculation of Complexity Costs: An Approach for Rationalizing a Product Program", In: Proceedings of NordDesign Conference 2012, Aalborg University, Center for Industrial Production, 2012.
- [10] Ehrlenspiel, K.: "Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozeßorganisation, Produkterstellung und Konstruktion", Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- [11] Jeschke, A.: "Beitrag zur wirtschaftlichen Bewertung von Standardisierungs-Maßnahmen in der Einzel- und Kleinserienfertigung durch die

---

Konstruktion", Dissertation, Institut für Konstruktionslehre, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 1997.

- [12] Borowski, K.-H.: "Das Baukastensystem in der Technik: Band 5 von Wissenschaftliche Normung", Springer Verlag, Berlin, 1961.
- [13] Ponn, J.: "Literaturrecherche zur Baukasten- und Variantenproblematik in der Produktentwicklung", Semesterarbeit (unveröffentlicht), Lehrstuhl für Produktentwicklung, Technische Universität München, München, 2000.
- [14] Greshake, P.-T.: "Modularität - das richtige Maß entscheidet", Kundenmagazin der 3DSE Management Consultants GmbH, no. 5, pp. 6–17, 2011.
- [15] Braun, B.: "Entwurf und Validierung eines Benchmarking-Systems für Entwicklungsbereiche und -projekte", Semesterarbeit (unveröffentlicht), Lehrstuhl für Raumfahrttechnik, Technische Universität München, München, 2011.
- [16] Stauske, P.: "Nutzfahrzeug – Varianz in Produktentstehungsprozess und Produktstruktur bei MTB", Braunschweig, 2012.
- [17] Kreimeyer M.; Förg, A.; Lienkamp, M.: "Mehrstufige modulatorientierte Baukastenentwicklung für Nutzfahrzeuge", VDI-Fachtagung Nutzfahrzeuge, 2013.
- [18] Heintze, W.: "Erfolg durch Kundennähe: Komplexitätsbeherrschung im Portfolio-übergreifenden Produktbaukasten", PTC Live Executive Exchange, Würzburg, 27.6.2013.



## Effizientes Variantenmanagement durch modulare Produktkonfiguratoren

Peter Gerber

*Entwicklungsmethoden*

*Schaeffler Technologies AG & Co. KG*

### 1 Ausgangslage

Stetig steigende Funktionsdichte in immer kleiner werdenden Bauräumen erfordert passgenaue und individuelle Lösungen. Gleichzeitig stehen wir, Schaeffler, den Erwartungen gegenüber, zeitnah innovative und neuartige Varianten produktionsreif zu erzeugen.

Effektive und dabei auch effiziente Lösungen können nur dann sichergestellt werden, wenn wir neben kundenspezifischen Neuentwicklungen die Nutzung vorhandener und die Schaffung neuer Baukästen und Baureihen intensivieren (siehe Bild 1). Alle Entwicklungen müssen den Ansprüchen der Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie genügen und es muss "jahrelange Verfügbarkeit und eindeutige Identifizierung der jeweiligen Varianten" sichergestellt werden. Jede Variante muss entsprechend der Regelungen dokumentiert und archiviert werden.

Die Administration, der Umfang an Daten, die notwendige Wissensvielfalt und die Zunahme der Komplexität nehmen seit Jahren stark zu. Engpassressource "Konstrukteur" beschäftigt sich zunehmend mit der Verwaltung und Pflege von bereits entwickelten Varianten.

## Typen der Entwicklung bei Schaeffler

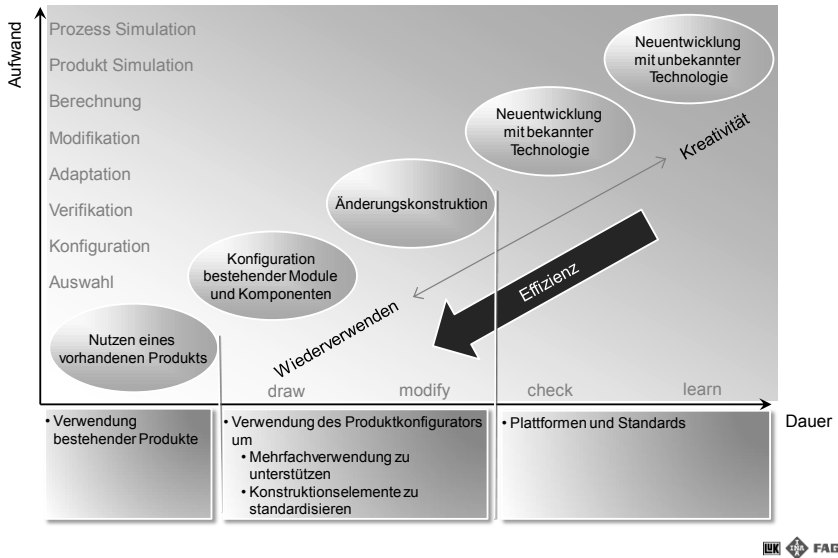


Bild 1: Entwicklungsarten bei Schaeffler

## 2 Vorgehen

Nachträgliche Reduzierung und Harmonisierung von Varianten sind mit einem erheblichen Aufwand verbunden und erfordern tiefgehende Detailarbeit. Wir setzen insbesondere bei ausgereiften Produkten auf eine Vermeidungsstrategie. Dort werden Baureihen und Baukästen entwickelt, um die Entwicklung von unnötigen Varianten zu vermeiden (siehe Bild 2).

- Das Suchen und Finden von notwendigen Informationen ist eine zentrale Aufgabenstellung in der Unternehmenszukunft. Ein sicheres System zur Produktfindung ist effektiver als die Entwicklung und Verwaltung von Varianten.
- Durch die Mehrfachnutzung und Wiederverwendung von teuren Komponenten werden Kosten gespart. Konfiguratoren erlauben eine auf Wiederverwendung ausgelegte automatisierte Konstruktion.

- Die Vermeidung unnötiger Formelemente wird durch standardisierte Konstruktionsmodule in den Konfiguratoren erreicht und reduziert Betriebsmittel- Fertigungs- und Logistikaufwände.

## Standardisierung, von Konfiguratoren unterstützt

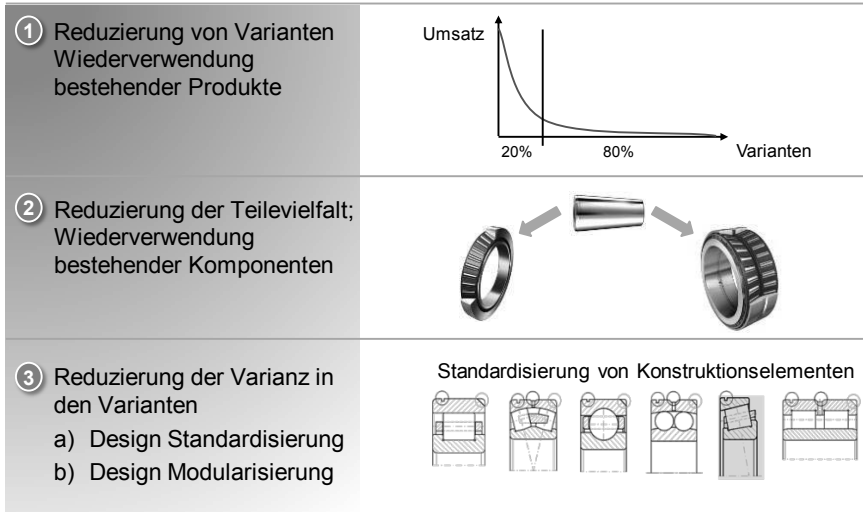


Bild 2: Variantenreduktion auf 3 Ebenen

### 3 Umsetzung

Unnötige Produktvarianten im Tagesgeschäft eines global agierenden Unternehmens zu vermeiden ist eine große Herausforderung. Insbesondere bei mehr als 200.000 lebenden Produkten und Varianten scheint es für Entwickler einfacher und schneller eine neue Variante anzulegen als eine vorhandene zu verwenden.

An die erforderliche Disziplin der Entwickler zu appellieren ist bei Termin und Kostendruck nicht ausreichend. Die Entwickler müssen durch die Wiederverwendung von Vorhandenem einen direkten Nutzen im eigenen Arbeitsbereich erzielen.

Klassische Standards und Normen helfen unnötige Varianz einzudämmen, werden aber für Entwickler als Einschränkung der Kreativität wahrgenommen.

Der Lösungsansatz besteht darin, die Einhaltung der Standards so zu vereinfachen, dass eine Abweichung vom Standard für den Entwickler immer aufwendiger ist. Es wurden Routinetätigkeiten des Entwicklers automatisiert und einzuhaltende Standards so in das KBE (**K**nowledge **B**ased **E**ngineering) integriert, dass der Entwickler diese ohne eine gefühlte Einschränkung einhält.

## Architektur

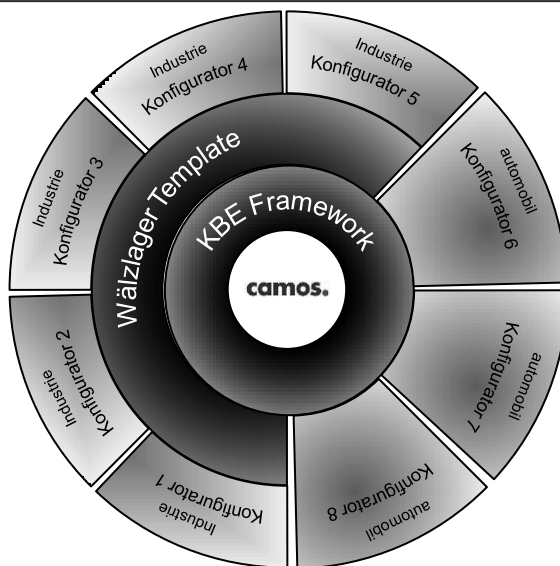


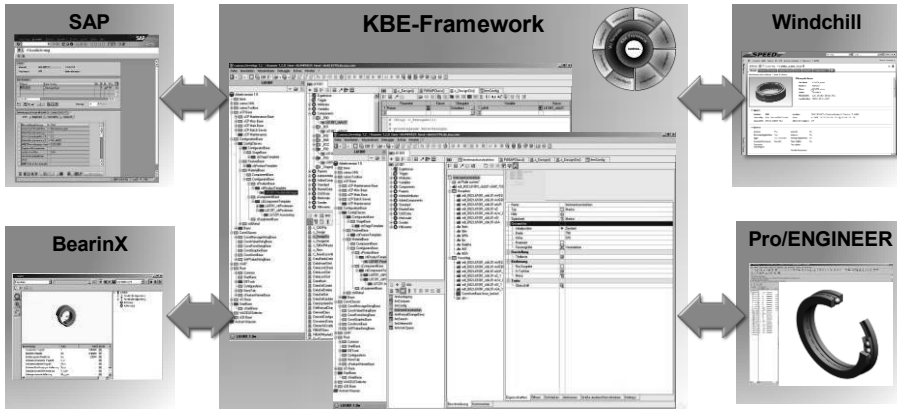
Bild 3: KBE Architektur

### 3.1 KBE Framework

Als Basis dient das KBE Framework (Bild 4). Es wurde geschaffen, um Routinetätigkeiten wie Stammdatenpflege, Dokumentenverwaltung etc. so zu unterstützen, dass ungeliebte Tätigkeiten regelkonform ohne Aufwand erledigt werden. Es beinhaltet alle relevanten Schnittstellen, PDM Regeln etc. um alle Automotive- und Wälzlager-Konfiguratoren zu unterstützen.



## KBE-Framework



- Schnittstellen zu allen relevanten Systemen und Anwendungen
  - Einheitlicher Konfigurationsprozess in allen Applikationen
  - Vordefinierte Komponenten für den Aufbau der Oberfläche
- **Einheitliches 'Look and Feel' und Grundfunktionalität**



Bild 4: KBE Framework

### 3.2 Wälzlager Template

Nachhaltige Standardisierung ist nur Produktbereich übergreifend möglich. Übergreifend definierte Normen für Formelemente, Produktstrukturen, Bezeichnungsregeln, etc. werden daher nicht in einzelnen Konfiguratoren umgesetzt sondern als Basismodule bereitgestellt. Dieser modulare Aufbau von Konfiguratoren vereinfacht die Erstellung und Pflege der Konfiguratoren und verringert die Gefahr von Fehlern. Das so definierte wälzlagerspezifische ‚Bearing Template‘ stellt so den gruppenweiten Rahmen für effiziente Wälzlager Konfiguratoren (siehe Bild 4). Bei der Definition von Baureihen, der Erstellung von Konstruktionsrichtlinien und Konfiguratoren werden seit Jahren zulässige Kombinationen definiert und dokumentiert. Anhand der vorhandenen Modulbausteine und der produktspezifischen Auslegungsvorschriften wird der Konfigurator zusammengestellt. Abhängigkeiten und wiederverwendbare Module der Ebene 2 (Teile) und Ebene 3 (Formelemente) werden in die Produktkonfiguratoren entsprechend der Richtlinien und Vorgaben eingegliedert.

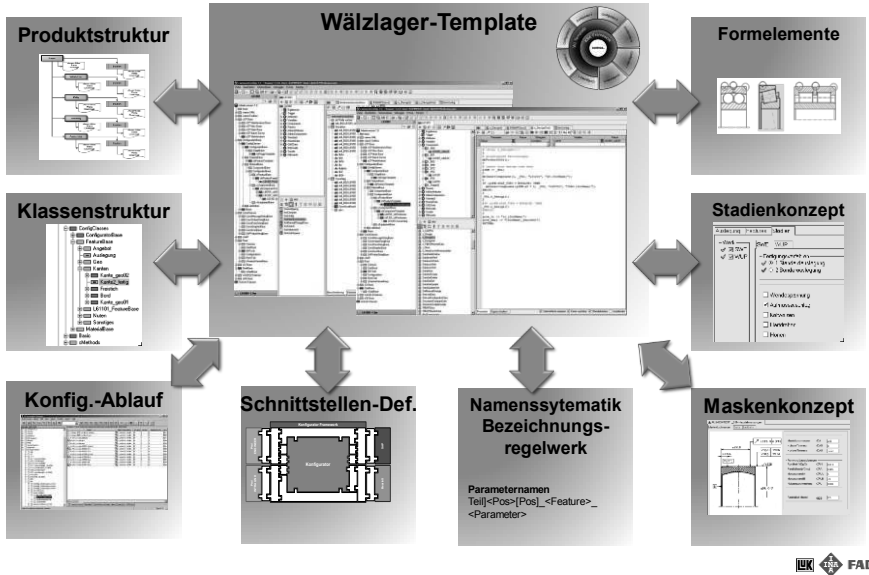
**Bearing -Template**

Bild 5: ‚Bearing Template‘

**4 Ergebnis**

Konfiguratoren sind keine neue Erfindung. Neu ist in der gewählten Methode die Konzentration auf wenig Wertschöpfende Tätigkeiten wie Datenpflege, Dokumenterstellung, Gleichteilsuche, etc.

Erfahrungen und Auswertungen des Umsetzungsprozess haben gezeigt, dass sich die Qualität hinsichtlich der Daten und Zeichnungen erheblich verbessert haben. Zusätzlich konnten wir gemeinsam die Durchlaufzeiten in der Konstruktion sichtbar senken. Auch die Aktualisierung ganzer Baureihen ist somit effizient möglich. Die Automatisierung der Standard-Auslegungsvorgänge bei ‚reifen‘ Produkten geben unseren Entwicklern mehr Raum zur kreativen Tätigkeiten und Entwicklung und sind somit das Fundament für "neugierig machende" Neuentwicklungen.

## Vom schließmaßbasierten Toleranzmanagement zum eigenschaftsbasierten Robust Design

Philipp Ziegler, Sandro Wartzack  
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Tolerancing is an important activity in product development to ensure the products functions and aesthetics in consideration of geometric variations caused by manufacturing and assembly uncertainty. Commonly, function and aesthetic are ensured by associated dimensions of the product. This contribution shows limits of this approach and proposes tolerancing based on the CPM/PDD-approach of Weber.

### 1 Toleranzmanagement

Der Produktentwickler legt die Gestalt der Bauteile eines Produkts fest, wobei er darauf achten muss dass die an das Produkt gestellten Anforderungen erfüllt werden. Die Fertigung der Komponenten des Produkts führt dazu, dass diese in ihrer Form immer von der vorgegebenen Nominalgeometrie abweichen. Diese Formabweichungen können je nach Ausprägung die funktionalen und ästhetischen Eigenschaften des Produkts beeinträchtigen. Um der Minderung der Produkteigenschaften entgegenzuwirken, werden die geometrischen Abweichungen mithilfe von Toleranzen beschränkt. Da Bauteile, welche nur gering von der Nominalgeometrie abweichen dürfen, gewöhnlich aufwändiger zu fertigen (und damit teurer) sind als jene, die stärker abweichen, sollte die Vergabe von engen Toleranzen vom wirtschaftlichen Gesichtspunkt aus möglichst vermieden werden. Um die Anforderungen an funktionale und ästhetische Produkteigenschaften durch eine wirtschaftlich mög-

lichst günstige Toleranzvergabe zu erfüllen, wird der Prozess des Toleranzmanagements durchgeführt. Das Toleranzmanagement kann als Prozess mit den Teilschritten Toleranzanalyse, Toleranzbewertung und Toleranzvergabe (bzw. Toleranzanpassung) formuliert werden, der so oft durchlaufen wird bis das gewünschte Ergebnis vorliegt (Bild 1).

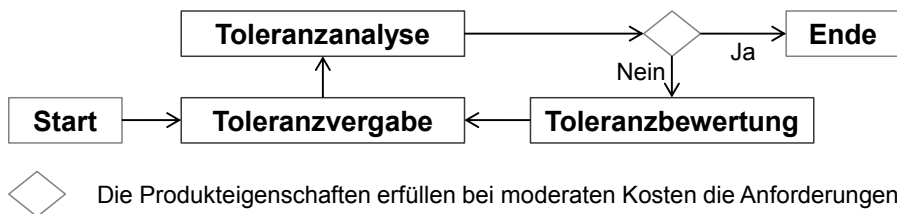


Bild 1: Der Toleranzmanagement-Prozess

Bei der Toleranzvergabe legt der Produktentwickler die Toleranzen mit zugehörigen Bezügen und Toleranzwerten fest. In der Toleranzanalyse werden mithilfe analytischer oder numerischer Werkzeuge die funktionalen und ästhetischen Eigenschaften des Produktes, die sich aus den festgelegten Toleranzen ergeben, ermittelt (typischerweise als statistische Kenngrößen). Falls die Produkteigenschaften die Anforderungen nicht erfüllen, werden die Zusammenhänge der Toleranzen mit den Eigenschaften ausgewertet und die Toleranzen angepasst, womit der Zyklus von neuem beginnt.

## 2 Key Characteristic und Schließmaß

Um beurteilen zu können, ob durch die festgelegte Tolerierung die funktionalen und ästhetischen Eigenschaften des Produktes abgesichert sind, bedient man sich der sogenannten **Key Characteristics (KC's)**. *Key Characteristics are the product, subassembly, part, and process features that significantly impact the final cost, performance, or safety of a product when the KCs vary from nominal* [6]. Vor der Durchführung des Toleranzmanagement-Prozesses müssen zu allen berücksichtigten Produkteigenschaften ein oder mehrere passende Key Characteristics gefunden werden. Zwei Beispiele hierfür sind in Bild 2 gegeben: Da die Lebensdauer eines Wälzlagers stark vom Betriebslagerspiel, dem Spiel des Innenrings im Bezug zum Außenring des Lagers, abhängt, ist das Betriebslagerspiel eine Key Characteristic. Damit ein Fahrzeug den Eindruck vermittelt, hochwertig verarbeitet zu sein, sind die Spalte zwischen den einzelnen Verkleidungsteilen entscheidend: Sie sollen möglichst klein und gleichförmig sein.

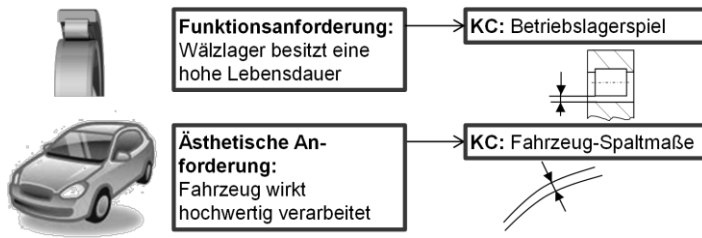


Bild 2: Zwei typische Key Characteristics

Im Toleranzmanagement sind die Key Characteristics so gut wie immer geometrische Maße. Im Deutschen hat sich analog dazu das **Schließmaß** eingebürgert [7]. Dieses wurde im Kontext der vektoriellen Toleranz- und Abweichungsrepräsentation definiert. Der Begriff kommt davon, dass das Schließmaß das Maß ist, welches „die Toleranzkette schließt“. Die Toleranzkette wird später näher erläutert. Die Anforderungen an die Produkteigenschaften müssen nun in geometrische Anforderungen an die abgeleiteten Key Characteristics übertragen werden.

## 2.1 Key Characteristic Flowdown

Eine identifizierte Key Characteristic kann ein geometrisches Maß

- Fall 1: an einem Feature eines Bauteils
- Fall 2: zwischen zwei Features eines Bauteils
- Fall 3: zwischen zwei Features von zwei verschiedenen Bauteilen

sein. Ein Feature ist nach Shah eine generische Fläche, die für den Ingenieur mit Attributen bzw. Wissen über das Produkt verknüpft ist (z.B. eine Sacklochbohrung). In Fall eins und zwei ist die Anforderung an die Key Characteristic eine Toleranz. Im dritten Fall kann die Anforderung nicht mit einer Toleranz abgesichert werden. Es muss die Toleranzkette zwischen beiden Features aufgestellt werden, die sich über mehrere Bauteile erstrecken kann.

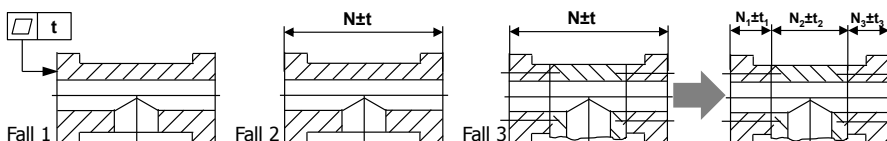


Bild 3: Beispiel für Key Characteristics einer Rohrverteilung (links in einem Teil, rechts aus drei Teilen)

---

Bild 3 zeigt die verschiedenen Fälle von Key Characteristics. In den linken beiden Fällen ist die Anforderung an die Features eine Toleranz. Für die Baugruppe rechts daneben muss die Key Characteristic in Toleranzen für die Einzelbauteile zerlegt werden. Dieser Prozess nennt sich **Key Characteristic Flowdown** [6].

Für die Übertragung der Produkteigenschafts-Anforderungen an KC-Anforderungen wird der Toleranzmanagement-Prozess in einem ersten Schritt durchlaufen. Wenn dieser Prozess abgeschlossen ist, muss in Fall 3 der Toleranzmanagement-Prozess ein zweites Mal durchlaufen werden, um das KC der Baugruppe in Toleranzen für die Einzelteile zu zerlegen. Die Lösung dieser Aufgabe kann bei größeren Baugruppen sehr komplex werden. Des Weiteren ist das Ergebnis nicht eindeutig, in Fall 3 in Bild 3 kann durch verschiedenste Kombinationen von  $t_1$ ,  $t_2$  und  $t_3$  die Schließmaßtoleranz  $t$  abgesichert werden.

## 2.2 Correlation Uncertainty

Der Begriff der „Correlation Uncertainty“ ist ein relativ neuer Begriff. *Correlation uncertainty characterises the fact that the intended functionality and the controlled characteristics may not be perfectly correlated* [4]. Obwohl somit bekannt ist, dass eine Key Characteristic nicht perfekt die zugehörige Funktion absichern muss, ist dieses Problem laut Srinivasan bisher wenig beachtet worden: *Correlation uncertainty, in particular, is an uncharted territory. Standards don't tell us how to find this. They provide a language to describe it. This should be an area for some intense research* [13]. Man könnte die Correlation Uncertainty als eine Art Abbildungs-Unsicherheit sehen: die Anforderung an die Funktion im Funktionsraum wird nicht sauber auf eine Anforderung an die Geometrie im physischen Raum übertragen. Die Correlation Uncertainty ist ein nicht unerheblicher Schwachpunkt des Schließmaßkonzeptes.

## 3 Varianten der Toleranzanalyse-Problemstellung

Aufgrund der stetig steigenden Computer-Rechenleistung haben sich die Simulationsmodelle für die Toleranzanalyse in den letzten zwei Dekaden stark weiterentwickelt. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die Art und Weise, wie geometrische Abweichungen modelliert werden können, sondern ebenso auf die Art wie die Problemstellung formuliert wird.

Die Abbildung fertigungsbedingter Bauteilabweichungen durch Finite-Elemente-Netze, welche in den letzten Jahren aufgekommen ist und mit der zum ersten Mal realistisch Formabweichungen abgebildet werden können,

---

bietet die Möglichkeit die Zusammenhänge zwischen Produkteigenschaften und fertigungs- sowie montagebedingten Abweichungen direkt zu analysieren. In [8] wurde beispielsweise der Einfluss geometrischer Abweichungen auf die Durchbiegung eines einseitig eingespannten Bauteils unter Belastung simuliert. Dadurch wurde die *Zuverlässigkeit (Reliability)* des Modellbauteils bestimmt und mit der Zuverlässigkeit des Bauteils ohne geometrische Abweichungen verglichen, wobei sich ein signifikanter Unterschied bei den Ergebnissen zeigte. Die Produktnutzung wird zwar schon erfolgreich in die Toleranzanalyse eingebunden, es werden bisher aber immer noch Schließmaße gemessen. Im angeführten Beispiel wäre z.B. die Integration einer Belastungs-Simulation sinnvoll, bei der das Bauteilversagen als Key Characteristic analysiert wird. Da somit das Toleranzmanagement nicht mehr als separater Prozess gesehen werden kann, da es Elemente fachverwandter Produktabsicherungen integriert, wäre der allgemeinere Begriff **Robust Design** sinnvoller.

Ein relativ neuer Ansatz ist die Formulierung der Toleranzanalyse als ein sogenanntes *Quantified Constrained Satisfaction Problem (QCSP)* [9]. Sie formuliert die Toleranzanalyse als Bedingung an die analysierte Baugruppe, die diese einhalten soll. Für uns ist vor allem die mathematische Bedingung, dass die Baugruppe montierbar ist (was vor allem für überbestimmte Systeme ein interessantes Problem ist), von Bedeutung. Die abweichungsbehafteten Bauteile werden zusammengebaut (wobei Sie kollidieren dürfen) und zufällig zueinander verschoben um zu sehen ob eine Position der Bauteile existiert, so dass Sie montierbar sind. Die Key Characteristic des Modells ist also kein Maß sondern nimmt einen der beiden Zustände „System besitzt/besitzt keine spannungsfreie Montageendposition“ an. Die alternative mathematische Formulierung des Toleranzmanagement-Problems mithilfe des QCSP erweitert das Spektrum der möglichen Key Characteristics, indem in der Simulation der Anteil der montierbaren Baugruppen direkt berechnet werden kann. Das Schließmaßkonzept ist in diesem Rahmen überflüssig.

#### 4 Eigenschaftsgetriebene Produktentwicklung nach Weber

Die Eigenschaftsgetriebene Produktentwicklung (*Property driven development CPM*) auf der Basis von Merkmalen und Eigenschaften ist ein von Weber 2000 eingeführter Ansatz, um die Modellierung von Produkten sowie den Produktentwicklungsprozess abzubilden [1]. Der Ansatz unterscheidet zwischen Merkmalen (*characteristics C<sub>i</sub>*) und Eigenschaften (*properties P<sub>i</sub>*) eines Produktes. Die folgende Definition ist aus [1] übernommen:

- Die Merkmale erfassen die Gestalt eines Produktes, definiert durch die (Teile-) Struktur, die räumliche Anordnung der Komponenten sowie die Formen, Abmessungen, Werkstoffe und Oberflächenparameter aller Bauteile („Struktur und Gestalt“, „Beschaffenheit“). Nur diese Parameter können vom Produktentwickler direkt beeinflusst werden.
- Die Eigenschaften bezeichnen das Verhalten des Produktes, z.B. Funktion, Sicherheit, Zuverlässigkeit, ästhetische Eigenschaften, aber auch Fertigungs-/Montage-/Prüfgerechtigkeit, Umweltgerechtigkeit, Herstellkosten usw. Die Eigenschaften können vom Produktentwickler nicht direkt festgelegt werden, sondern eben nur über den Umweg, dass er bestimmte Merkmale ändert, welche sich ihrerseits in der gewünschten Weise auf bestimmte Eigenschaften auswirken.

Bild 4 stellt die Zusammenhänge zwischen Merkmalen und Eigenschaften graphisch dar. Diese stehen über Relationen  $R_j$  in Verbindung, wobei die Relationen den Eigenschaften zugeordnet sind. Die Abhängigkeiten  $D_x$  zwischen den Merkmalen werden nicht weiter ausgeführt. Ziel ist es, dass die Eigenschaften  $P_j$  die Required Properties  $PR_j$  annehmen. Hierzu werden Analyse- und Syntheseschritte durchgeführt.

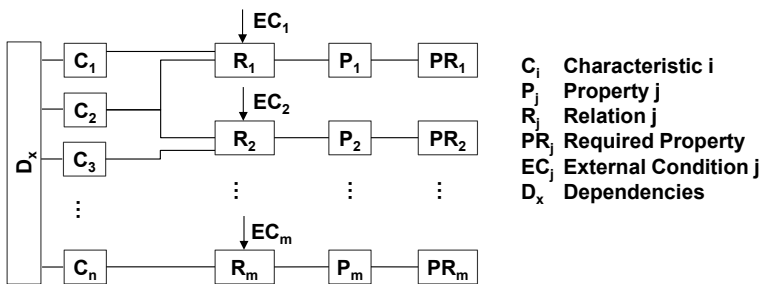


Bild 4: Zusammenhänge zwischen Merkmalen und Eigenschaften nach [1]

Das Modell erinnert an Ansätze zu Systemen mit Eingangsgrößen ( $\approx C_i$ ), dem System ( $\approx R_j$ ), den Ausgangsgrößen ( $\approx P_j$ ) und Störgrößen ( $\approx EC_j$ ) mit ein paar Besonderheiten. Die Relationen sind nicht untereinander verknüpft, sie sind jeweils eindeutig einer zugehörigen Eigenschaft zugeordnet. Die Zusammenhänge zwischen den Merkmalen  $D_x$  werden nicht weiter ausgeführt, Sie stellen aber im Toleranzmanagement eine wichtige Kenngröße dar und werden dort sehr stark aufgegliedert. Des Weiteren sind die Anforderungen an die Eigenschaften ebenfalls unabhängig voneinander. Die Definition der

Eigenschaften (z.B. die Zuverlässigkeit) ist für eine allgemeinere Formulierung der Toleranzanalyse-Problestellung sehr gut geeignet.



#### 4.1 Toleranzmanagement als PDD-Prozess

Im Weiteren wird der Key Characteristics Flowdown Prozess mithilfe numerischer Methoden betrachtet. Nicht berücksichtigt werden Oberflächenangaben, da sie im Toleranzmanagement üblicherweise nicht berücksichtigt werden. Es wird davon ausgegangen, dass das Montagekonzept nicht verändert werden kann und einzig das Toleranzschema für das Produkt festgelegt wird. Davon werden im Weiteren die Merkmale und Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen **im Toleranzmanagement** abgeleitet. Die den Abhängigkeiten zugeordneten Größen können sehr wohl auch Merkmale sein, nicht aber bei der reinen Toleranzanalyse!

##### 4.1.1 Merkmale Ci im Toleranzmanagement

Die Merkmale im Toleranzmanagement sind die Toleranzen. Diese beschränken Gestalt (Maß-, Form- und Lagetoleranzen) sowie Beschaffenheit (Formtoleranzen) des Produktes. Jedes Merkmal hat mehrere zugeordnete Attribute, die alle festgelegt sein müssen, damit das Merkmal klar definiert ist.

Tabelle 1: Merkmale im Toleranzmanagement

<b>Toleranz-Merkmal</b>	<b>Merkmalsattribute</b>	<b>Beispiel</b>
Maßtoleranz	Unterer Grenzwert	+0,3; -0,125
	Oberer Grenzwert	+0,8; -0,525
Maßtoleranz (Passung)	Toleranzzone	IT 7
	Abstand zum Nennmaß	H
Formtoleranz	Toleranzart	
	Toleranzwert	0,3
Lagetoleranz	Toleranzart	
	Toleranzwert	0,5
	Bezüge	 

Maß- und Formtoleranzen sind jeweils durch zwei Attribute definiert, bei den Lagetoleranzen kommen noch zusätzlich die Bezüge dazu. Des Weiteren sind die Attribute bei Maßtoleranzen noch voneinander abhängig (der untere Grenzwert muss immer kleiner als der obere Grenzwert sein).

### 4.1.2 Abhängigkeiten $D_x$ im Toleranzmanagement

Die Toleranz-Merkmale hängen **immer** von weiteren Merkmalen ab. Dies folgt aus der Definition der Toleranzen – eine Toleranz ist immer eine **Bedingung** an ein geometrisches Element (=ein Merkmal) eines Bauteils. Die Abhängigkeit ist eine einseitig gerichtete. Die Merkmale, auf die sich die Toleranz-Merkmale beziehen, können entweder strukturelle Merkmale (Flächen, Kurven, Linien, Punkte) oder geometrische Merkmale in der Form von dimensionalen Merkmalen (Maße) sein. Maßtoleranzen beziehen sich auf dimensionale Merkmale, Formtoleranzen auf strukturelle Merkmale und Lagetoleranzen auf dimensionale sowie strukturelle Merkmale. Bild 5 zeigt an einem Rechteck je eine exemplarische Maß-, Form- und Lagetoleranz.

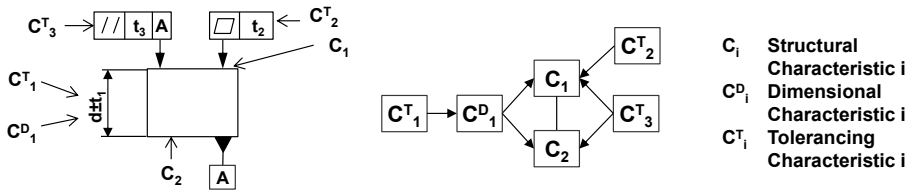


Bild 5: Abhängigkeit der Toleranz-Merkmale von weiteren geometrischen Merkmalen

Die Visualisierung der Beziehungen kann mithilfe eines Graphen (wie im Toleranzbereich gebräuchlich) wie in Bild 5 erfolgen, sowie mithilfe einer Merkmal-Merkmal-Matrix. Ein Graph besteht aus Knoten (den Merkmalen) und Kanten die gerichtet oder ungerichtet sein können (den Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen). Solange der Graph eine einfache Form wie in Bild 5 annimmt, ist zu einer Merkmal-Merkmal-Matrix ein eindeutiger Graph zugeordnet und umgekehrt. Dies gilt nicht mehr, falls zur Beschreibung ein Hypergraph nach Giordano [10] genutzt wird. Dieser bildet nicht nur direkte Merkmals-Merkmal-Beziehungen ab, sondern auch Beziehungen zwischen mehreren Merkmalen (die Zusammenfassung von Merkmalen zu Merkmalen höherer Ordnung), die nicht in direkte Beziehungen zwischen je zwei Merkmalen ausgedrückt werden können. Tabelle 2 zeigt die Relationen des Graphen aus Bild 5 mithilfe einer Merkmal-Merkmal-Matrix.

Tabelle 2: Merkmal-Merkmal-Matrix zum Rechteck in Bild 5

	$C_1$	$C_2$	$C^D_1$	$C^T_1$	$C^T_2$	$C^T_3$
$C_1$		X				
$C_2$	X					
$C^D_1$	X	X				
$C^T_1$			X			
$C^T_2$	X					
$C^T_3$	X	X				

Die Relationen zwischen den strukturellen Merkmalen sind im Key Characteristic Flowdown Prozess von entscheidender Bedeutung: Sie bestimmen, wie die Key Characteristic in Toleranzen der einzelnen Bauteile zerlegt wird. Dazu kann der Graph zwischen den beiden strukturellen Merkmalen, für die die Key Characteristic gilt, betrachtet werden. Die Kanten zwischen diesen Merkmalen geben die Toleranzkette an, deren strukturelle und dimensionale Merkmale mit Toleranz-Merkmalen beschränkt werden müssen.

### 4.1.3 Eigenschaften und Erforderliche Eigenschaften

Aufgrund der Toleranzanalyse-Varianten, die in Abschnitt 2 genannt wurden, können die Eigenschaften im Toleranzmanagement verschiedener Art (geometrische Größen, Montierbarkeitsbedingungen, Versagenswahrscheinlichkeit usw.) sein. Wichtig bei den erforderlichen Eigenschaften ist, dass nicht nur ein Zielwert gegeben sein muss sondern auch eine Bedingung, wann Abweichungen vom Zielwert toleriert werden (z.B. wie viele „parts per million“ maximal nicht montierbar sein dürfen).

## 5 Eigenschaftsgetriebene Produktentwicklung

Zum Aufbau des Toleranzmodells für die Eigenschaften  $E_i$  kann die Merkmal-Eigenschaft-Matrix für das Toleranzmanagement herangezogen werden. Bevor die Toleranzen festgelegt sind, liegt hierbei die Matrix mit den dimensional und strukturellen Merkmalen vor. Alle für die Eigenschaft wichtigen Merkmale werden mit geeigneten Toleranzmerkmalen versehen. Im Tole-

ranzmanagement-Prozess werden dann die Attribute der Merkmale (Toleranzzone oder Art der Lagetoleranz) angepasst, Merkmale entfernt oder zusätzlich hinzugefügt. Der Einfluss der Toleranzmerkmale auf die Eigenschaften kann hierbei zum Beispiel über varianzbasierte statistische Techniken [2] ermittelt werden.

Beim KC-Flowdown (Abschnitt 1.2) wird üblicherweise eine Kette von Koordinatentransformationen aufgestellt. Hierbei ist die graphenbasierte Darstellung der strukturellen Merkmale hilfreich. Zwischen den beiden Merkmalen, deren Lage zueinander beschränkt werden muss, können hierbei die nötigen Dimensions- und Toleranzmerkmale ermittelt werden. Die Transformationskette muss eindeutig sein, das heißt alternative Pfade im Graphen werden durch Zwangsbedingungen im Simulationsmodell berücksichtigt.

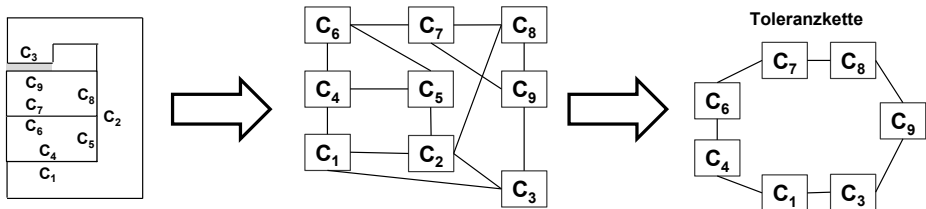


Bild 6: Die Generierung der Transformations- oder Toleranzkette

Bild 6 zeigt an einer einfachen Baugruppe die Generierung der Toleranzkette. Der Graue Bereich zwischen C<sub>9</sub> und C<sub>3</sub> stellt die *Key Characteristic* (nach Thornton!) dar. Die Beziehungen zwischen allen strukturellen Merkmalen werden rechts daneben als Graph dargestellt. Hierbei sind die bauteilinternen Beziehungen (z.B. Lage von C<sub>1</sub> zu C<sub>3</sub>) mit durchgezogenen Linien dargestellt, Montagebeziehungen mit Strichpunkt und das KC durch eine Strichlinie. Aus den primären Montage-Kontaktflächen wird die Toleranzkette gebildet, wobei die weiteren Beziehungen als Zwangsbedingungen in der Berechnung berücksichtigt werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der CPM/PDD-Ansatz nach Weber zur Formulierung des Toleranzmanagement-Prozesses geeignet ist. Ein Problem stellt die Bezeichnung der Characteristics dar, da sich diese leicht mit den Key Characteristics nach Thornton (die normalerweise als geometrische Merkmale nach Weber formuliert sind) verwechseln lassen. Durch die aktuellen Forschungsarbeiten im Toleranzmanagement [8] [9] werden die Simulati-

---

onsmodelle für das Toleranzmanagement komplexer. Die Formulierungen der Toleranzanalyse sind teilweise sehr mathematisch gehalten, dadurch schwer zu verstehen und stark an der verwendeten Berechnungsmethode angelehnt (z.B. [9]). Eine allgemeinere Formulierung wie der CPM/PDD Ansatz ist hierbei hilfreich, da er verständlich und unabhängig von der rechnerischen Umsetzung ist.

Der vorliegende Artikel wurde mit der Erwartung verfasst, dass in den nächsten Jahren der Trend aufkommen dürfte, virtuelle Versuche mit abweichungsbehafteten Bauteilen durchzuführen und die Zusammenhänge zwischen Abweichungen und Eigenschaften direkt zu bestimmen. Potential bietet der CPM-Ansatz hierbei, falls die Übertragung von Eigenschaften auf Schließmaße aufgrund der sogenannten „Correlation uncertainty“ nicht sauber möglich ist.

Weiterhin bietet die Zerlegung der Merkmals-Eigenschafts-Zusammenhänge durch Clustering in voneinander unabhängige Gruppen die Möglichkeit, mehrere voneinander unabhängige Toleranzanalyse-Modelle für eine Baugruppe (oder ein ganzes Produkt) methodisch sauber festzulegen. Hierzu wäre der nächste Schritt, bestehende matrixbasierte Methoden [11] für die Anwendung auf graphenbasierte Toleranzanalyse-Modelle (wie z.B. in [12] beschrieben) zu untersuchen. Hierbei muss als erster Schritt ein geeigneter Graph für die Matrix-Darstellung aus den existierenden Toleranzgraphen ausgewählt werden [12], da sich die existierenden Toleranzgraphen im Detail sehr stark voneinander unterscheiden.

## Literatur

- [1] Weber, C.: "Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz", 23. DfX-Symposium 2012, Oktober 2012, S.25-62.
- [2] Ziegler, P.; Breitsprecher, T.; et al.: "Application of Sensitivities on Simulation-Data-Based Metamodels during the Product Synthesis", Proceedings of the 12th International Design Conference 2012, Dubrovnik, S. 589-598.
- [3] Hasenkamp, T.; Arvidsson, M.; Gremyr, I.: "A review of practices for robust design methodology", Journal of Engineering Design, Vol. 20, Nr. 6, 2009, S. 645-657.

- 
- [4] Vincent, J. P.; Dantan, J. Y.; Goch, G.; Bigot, R.: "Comparison of gear geometrical specification models regarding to the functional aspect", in: *Product Lifecycle Management: Geometric Variations*, 2013, DOI: 10.1002/9781118557921.ch28.
- [5] Hong, Y. S.; Chang, T.-C.: "A comprehensive review of tolerancing research", *International Journal of Production Research*, Vol. 40, Nr. 11, 2002, S. 2425-2459.
- [6] Thornton, A. C.: "A Mathematical Framework for the Key Characteristic Process", *Research in Engineering Design*, Vol. 11, 1999, S. 145-157.
- [7] Klein, B.: "Prozessorientierte Statistische Tolerierung", expert verlag, Renningen, 2007.
- [8] Schleich, B.; Wartzack, S.: "How to determine the influence of geometric deviations on elastic deformations and the structural performance?", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 207, Nr. 5, 2013, S. 754-764.
- [9] Dantan, J.-Y.; Qureshi, A.-J.: "Worst-case and statistical tolerance analysis based on quantifier constraint satisfaction problems and Monte Carlo simulation", *Computer Aided Design*, Vol. 41, 2009, S. 1-12.
- [10] Giordano, M.; Pairel, E.; Hernandez, P.: "Complex Mechanical Structure Tolerancing by Means of Hypergraphs", Davidson, Joseph K. (Hrsg.): *Models for Computer Aided Tolerancing in Design and Manufacturing*, Arizona State University, Springer-Verlag, 2005, S 105-114.
- [11] Luft, T.; Wartzack, S.: "Die matrixbasierte Produktbeschreibung als Bestandteil des Vorgehensmodells in der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung", *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*, 20.06.2013, Stuttgart, 2013.
- [12] Andratschke, J.: "Graphenbasierte Bemaßungs- und Toleranzrepräsentation", Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2013.
- [13] Srinivassan, V.: „An integrated view of geometrical product specification and verification“, *CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing*, Frankreich, 2001.

## **Analyse von Unsicherheitsverknüpfungen im Lebenslauf lasttragender Systeme mit der UMEA Methodik**

Tobias Eifler, Sebastian Zier, Hermann Kloberdanz,  
Herbert Birkhofer

*Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd)*  
*Technische Universität Darmstadt*

The aim of engineering design is the development of products that fulfill the customer expectations in terms of functionality, quality, etc. At the same time, every engineering product is exposed to a variety of unknown or only partly known, i. e. uncertain, influencing factors in its life cycle. Disturbances in production processes affect the variation of product properties around an initially planned value. Especially in case of load carrying systems, this can lead to severe consequences in combination with applied mechanical stress during use, regularly uncertain as well. Given that underlying interdependencies between influences in different life cycle processes as well as impacts on the product are usually hard to assess in early design stages, a comprehensive approach to evaluate uncertain effects of applied stress is presented.

Based on an overview of currently existing analyzing approaches and existing drawbacks, the relevance of the analysis of uncertain mechanical strains is derived. This leads to an extension of the elaborated Uncertainty Mode and Effects Analysis (UMEA) by an abstract description of product structures and a suitable characterization of interfaces. The elaborated approach offers the possibility for an early analysis of existing interdependencies between uncertain influences in the product life cycle and an evaluation of resulting consequences for the transmission of applied stresses in load carrying systems.

---

## 1 Einleitung

Das Ziel der Produktentwicklung ist die Entwicklung technischer Systeme, die eine gewünschte Funktion erfüllen und hinsichtlich Kosten, Qualität, Zuverlässigkeit etc. den Kundenanforderungen entsprechen [1]. Gleichzeitig sind technische Systeme in ihrem späteren Lebenslauf einer Vielzahl von unterschiedlichen Einflussgrößen ausgesetzt [2]. Störgrößen in Produktionsprozessen, z.B. Werkzeugverschleiß oder Fehlbedienung, führen zu Abweichungen von den ursprünglich vorgesehenen Produkteigenschaften. Zusammen mit variierenden Nutzungsbedingungen kann dies zu unerwartetem Produktverhalten bis hin zu einer gestiegenen Fehlerwahrscheinlichkeit und einer eingeschränkten Lebensdauer führen.

Insbesondere in frühen Entwicklungsphasen sind jedoch sowohl die auftretenden Einflussfaktoren als auch deren Auswirkungen entlang des Produktlebenslaufs nicht vollständig bzw. gänzlich unbekannt, d.h. unsicher. **Unsicherheit in der Produktentwicklung** resultiert dementsprechend aus nicht umfassend beschreibbaren Einflussfaktoren in Produktions- und Nutzungsprozessen. Die Arbeitshypothese des Sonderforschungsbereichs (SFB) 805 "Beherrschung von Unsicherheit bei lasttragenden Systemen des Maschinenbaus" fasst zusammen [2]: "*Unsicherheit tritt auf, wenn die Prozesseigenschaften eines Systems nicht oder nur eingeschränkt determiniert werden können*".

Zur Sicherstellung der Produktqualität und zur Entwicklung robuster Produktlösungen muss die bestehende Unsicherheit möglichst frühzeitig berücksichtigt werden [3]. Dabei ist insbesondere die **Unsicherheitsverknüpfung** im Produktlebenslauf von Bedeutung, d.h. die gegenseitige Beeinflussung zwischen unsicheren Einflussfaktoren über einzelne Prozesse des Produktlebenslaufs hinweg [2, 3]. Bestehende Unsicherheitsverknüpfungen werden am Beispiel von Festigkeitsberechnungen deutlich. Die Beanspruchbarkeit eines lasttragenden Systems ergibt sich aus der in der Entwicklung definierten Struktur des Gesamtsystems, der festgelegten Gestalt einzelner Bauteile sowie den in Produktionsprozessen tatsächlich realisierten Querschnittsgeometrien und Materialkennwerten. Diese ist mit den in Nutzungsprozessen auftretenden, gewollten und ungewollten Belastungen zu vergleichen [4].

Für eine frühzeitige Berücksichtigung von Unsicherheit in der Produktentwicklung ist dementsprechend eine detaillierte Analyse von Zusammenhängen zwischen Produktkomponenten, den auftretenden Fertigungsabweichungen, den auftretenden äußeren Kräften und dem resultierenden Produktverhalten erforderlich. Es ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Welche Bedeutung hat Unsicherheit über Kraftauswirkungen für die Funktionsfähigkeit bzw. Lebensdauer eines entwickelten Produkts?
- Welche Einschränkungen ergeben sich für die frühzeitige Analyse entsprechender Unsicherheit mit verfügbaren Analysemethoden?
- Welche Abhängigkeiten zwischen Produktkomponenten bzw. Produkt und Lebenslaufprozessen müssen berücksichtigt werden, um unsichere Kraftauswirkungen frühzeitig und objektiv zu analysieren?

Zur Klärung der Fragestellungen zeigt der vorliegende Beitrag die Bedeutung einer frühzeitigen Analyse von unsicheren äußeren Belastungen im Nutzungsprozess technischer Systeme auf und grenzt die Analyse unsicherer Kraftauswirkungen von teilweise weit verbreiteten Analysemethoden ab. Darauf aufbauend wird ein Ansatz zur frühzeitigen Analyse der Abhängigkeiten zwischen Produktionsabweichungen, auftretenden Belastungen sowie resultierenden Auswirkungen bei lasttragenden Systemen vorgestellt.

## 2 Ganzheitliche Analyse von Unsicherheit in der Produktentwicklung

Im Folgenden sollen zunächst die Bedeutung von Unsicherheitsverknüpfungen im Produktlebenslauf sowie bestehende Möglichkeiten zur frühzeitigen Analyse von unsicheren Kraftauswirkungen aufgezeigt werden. Als Beispiel wird hierbei die in Bild 1 gezeigte Führung einer Welle verwendet. Entsprechend der Zielsetzung einer frühzeitigen Analyse im Entwicklungsprozess, ist das System abstrakt als Wirkstruktur dargestellt. Die grundlegende Funktion des Systems, d.h. die Realisierung einer Translationsbewegung zwischen Welle (Komponente **a**) und Führung (Komponente **b**) entlang der x-Achse, wird durch die Anordnung der Wirkflächenpaare, durch die verbindenden Wirkkörper und durch die gewollte Wirkbewegung konkretisiert. Die Eigenschaften des Systems werden durch Störgrößen in Produktionsprozessen beeinflusst (vgl. Bild 1 links). In Nutzungsprozessen treten ungewollte äußere Belastungen auf, z. B. eine Radialkraft in z-Richtung (vgl. Bild 1 rechts).

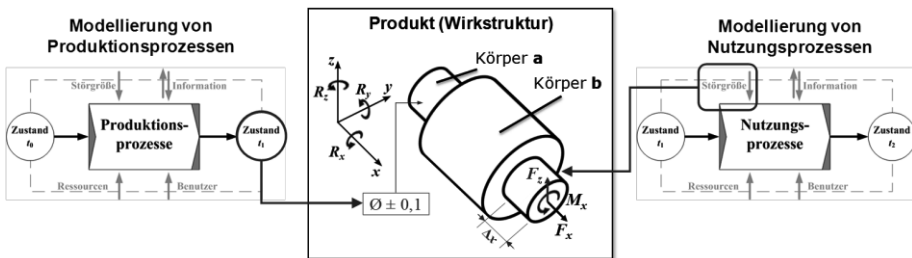


Bild 1: Darstellung von Unsicherheitsverknüpfungen im Produktlebenslauf

---

## 2.1 Unsicherheit über Kraftauswirkungen bei lasttragenden Systemen

Die Funktionsfähigkeit bzw. die Lebensdauer lasttragender Systeme ergibt sich in erster Linie durch unzulässige Verformungen, Bauteilversagen, Verschleiß sowie Korrosion [4]. In der Regel wird die Sicherheit eines Bauteils oder des Gesamtsystems gegen Versagen jedoch erst nach der Gestaltung durch Festigkeitsberechnungen, Strukturanalysen, etc. bestimmt. Zudem wird weder die mögliche Unsicherheit von Belastungen, Geometrien oder Materialkennwerten, noch der Zusammenhang zu ursächlichen Einflussfaktoren in Herstellungs- oder Nutzungsprozessen berücksichtigt [4, 5].

Um mögliche Kraftauswirkungen auch frühzeitig, d.h. vor einer detaillierten Berechnung zu berücksichtigen, werden in der Literatur eine Reihe von Gestaltungshinweisen zusammengefasst [1, 5, 6]. Beispiele sind Grundregeln, Prinzipien und Richtlinien zur Festlegung einer geeigneten Kraftleitung oder zur ausdehnungs-, korrosions- bzw. verschleißgerechten Gestaltung. Vor dem Hintergrund auftretender Unsicherheit ist dabei v. a. die Einhaltung einer eindeutigen Kraftleitung grundlegend [1, 7]. Werden Kräfte gleichzeitig über verschiedene Flächen eines Bauteils übertragen, kann es durch auftretende Unsicherheit, z. B. durch die Änderung einer Geometrie, zu erhöhten Kräften, Verformungen, Verschleiß, etc. kommen. Gleiche Effekte treten auch bei großen, flächigen Berührungen auf [7]. Die vorgesehene Translationsbewegung der Welle in Bild 1 erfordert beispielsweise eine hohe Genauigkeit der beteiligten Oberflächen. Fertigungsabweichungen wie die angegebene Toleranz des Wellendurchmessers können zu einer Einschränkung oder dem Versagen der Systemfunktion führen. Gleiches gilt auch für eine durch Wälzkörper umgesetzte Führung. Die Vielzahl kraftübertragender Flächen erfordert eine bei Wälzlagerungen übliche, hohe Genauigkeit der eingesetzten Wälzkörper [4].

Für die Entwicklung robuster Produkte ist die Berücksichtigung von unsicheren Kraftauswirkungen dementsprechend grundlegend. Während Unsicherheitsauswirkungen bei dem in Bild 1 dargestellten, aus lediglich zwei Komponenten bestehendem Beispielsystem jedoch leicht zu überblicken sind, ist die Einhaltung entsprechender Gestaltungshinweise in komplexen Systemen häufig schwierig.

## 2.2 Frühzeitige Analyse von unsicheren Einflussfaktoren

In Literatur und Praxis ist eine Vielzahl von Methoden zur Sicherstellung der Produktqualität verfügbar. Die Methodenabgrenzung in Bild 2 zeigt dabei zunächst den Fokus des vorliegenden Beitrags. Methoden der Qualitätssiche-

rung in der **Produktion** sind für eine frühzeitige Analyse von Unsicherheit in der **Entwicklung** in der Regel nicht geeignet. Darüber hinaus werden Einschränkungen für die frühzeitige Analyse von Kraftauswirkungen deutlich. Teilweise weit verbreitete Methoden zur Analyse der **Fehlerwahrscheinlichkeit** wie die Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) oder Lebensdauerberechnungen beruhen weitestgehend auf subjektiven Erfahrungen der Konstrukteure oder Informationen über bekannte Ausfallkriterien, Produktfehler, etc. Im Gegensatz dazu basieren Methoden zur Analyse und Beherrschung von **Unsicherheit** auf einer detaillierten mathematischen Beschreibung oder experimentellen Untersuchungen bestehender Prototypen [9].

	Fehlerwahrscheinlichkeit	Unsicherheit
Entwicklung	<b>Fehlervermeidung in der Entwicklung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Qualitativ: FMEA, FTA, ETA, HAZOP, RED, FFDM, ...</li> <li>▪ Quantitativ: Ausfallstatistiken, Tests, Lebensdauerberechnung, Lebensdauerersuche, Strukturanalysen, ...</li> </ul>	<b>Beschreibung und Beherrschung von Unsicherheit in der Entwicklung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unsicherheitsanalyse: Modellunsicherheit, Fehlerfortpflanzung, Sensitivitätsanalyse ...</li> <li>▪ Robust Design: Taguchi Quality, Engineering, Kinematic Design, ...</li> </ul>
Produktion	<b>Fehlervermeidung in der Produktion:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prozess FMEA</li> <li>▪ Qualitäts Tools: (Prüfblätter, Pareto Diagramme, Histogramme, ...)</li> <li>▪ Lean Manufacturing (Poka Yoke, Kaizen, Visuelle Kontrolle, ...)</li> </ul>	<b>Kontrolle von Produktionsabweichungen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Six Sigma methodology</li> <li>▪ Statistische Prozess Regelung</li> <li>▪ Prozessfähigkeitsindizes</li> <li>▪ ...</li> </ul>

Bild 2: Abgrenzung bestehender Analysemethoden [9]

Aufgrund der Unsicherheit über die in Bild 1 dargestellte Verknüpfung von Einflussfaktoren in Herstellungs- bzw. Nutzungsprozessen, den Produkteigenschaften und dem resultierenden Produktverhalten können die bestehenden Zusammenhänge in frühen Entwicklungsphasen dementsprechend nicht geeignet analysiert werden. Auch Abhängigkeiten zwischen den Produktkomponenten werden in bestehenden Methoden nicht detailliert berücksichtigt [9].

### 2.3 Uncertainty Mode and Effects Analysis

Für eine frühzeitige und umfassende Analyse von Unsicherheit im Entwicklungsprozess wird die Uncertainty Mode and Effects Analysis (UMEA) Methodik entwickelt [3]. Basierend auf einer strukturierten Darstellung von Produktions-, Montage- und Nutzungsprozessen werden auftretende Einflussgrößen systematisch identifiziert und standardisiert beschrieben, um entste-

hende Auswirkungen auf Produkteigenschaften und das Produktverhalten entlang der gesamten Prozesskette zu analysieren (vgl. Bild 3).

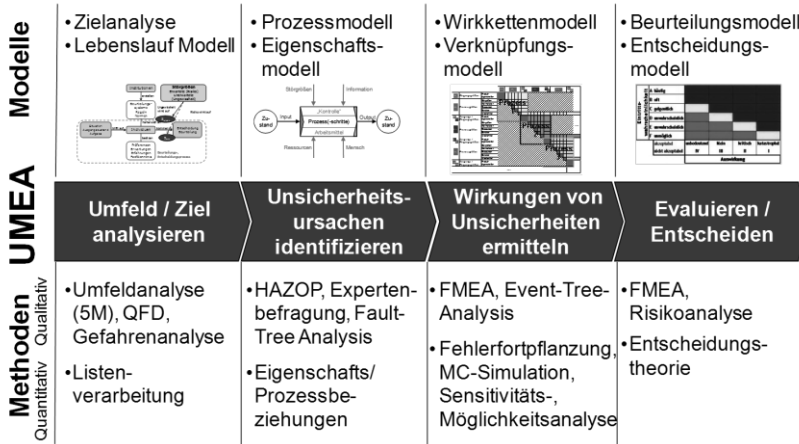


Bild 3: Vorgehensschritte der UMEA Methodik [3]

Genau wie der Überblick über bestehende Methoden (vgl. Abschnitt 2.2) zeigt die exemplarische Anwendung der UMEA Methodik im Rahmen von Forschungs- und Industrieprojekten, dass für die Unsicherheitsanalyse neben der Modellierung von Lebenslaufprozessen auch die strukturierte Beschreibung des untersuchten Produktsystems von zentraler Bedeutung ist. Erst durch die methodische Analyse bestehender Abhängigkeiten zwischen Produktkomponenten können Auswirkungen von unsicheren Einflüssen begründet abgeleitet werden. Im Folgenden wird deswegen eine Methode zur frühzeitigen und objektiven Analyse von unsicheren Kraftauswirkungen auf Grundlage von Wirkstrukturen vorgestellt. Die Charakterisierung der Wirkflächen durch die realisierten Schlussarten, d.h. durch die an einer Schnittstelle zwischen zwei Komponenten übertragenen Kräfte [10], bietet im Rahmen der UMEA Methodik die Möglichkeit bestehende Unsicherheitsverknüpfungen geeignet zu beschreiben und Unsicherheitsauswirkungen abzuschätzen.

### 3 Analyse von unsicheren Kraftauswirkungen

Die erarbeitete Methode zur Analyse von unsicheren Kraftauswirkungen gliedert sich in die *Charakterisierung von Schlussarten* und die *Analyse von Unsicherheitsauswirkungen*. Sie wird am Beispiel der in Bild 1 dargestellten Wellenführung vorgestellt. Entsprechend der Einteilung der UMEA Methodik in Modell- und Methodenebene baut die Methode auf der Modellierung von Le-



### 3.2 Analyse von Unsicherheitsauswirkungen

Auf der Charakterisierung der Schlussarten aufbauend werden die Auswirkungen unsicherer Einflussfaktoren im Produktlebenslauf ermittelt. Die Analyse basiert auf der Beschreibung von Wirkflächen und Bewegungssperrungen mit diskreten Stützpunkten. Die geometrischen Verhältnisse bei der Berührung eines Wirkflächenpaars können dabei auf die Lage und Anordnung der Stützpunkte zurückgeführt werden [8, 10], um so bei Abweichungen resultierende Änderungen von Schlussarten oder Freiheitsgraden abzuleiten.

Eine Änderung der kraftübertragenden Schlüsse zwischen Produktkomponenten kann aus Abweichungen resultieren, die sich in Produktions- und Montageprozessen ergeben. Die für das Beispielsystem angegebene Toleranz des Wellendurchmessers verändert beispielsweise den Abstand der Wirkflächen zueinander. Die Änderung wird durch den Abstand der sich auf den Wirkflächen ausbildenden Stützpunkte beschrieben (vgl. Bild 5 rechts). Eine positive Abweichung ( $+\Delta y, \Delta z$ ) führt zur Erhöhung der wirkenden Kraft, eine negative Abweichung ( $-\Delta y, \Delta z$ ) zu einer Kraftreduzierung bzw. Spiel zwischen den Flächen.

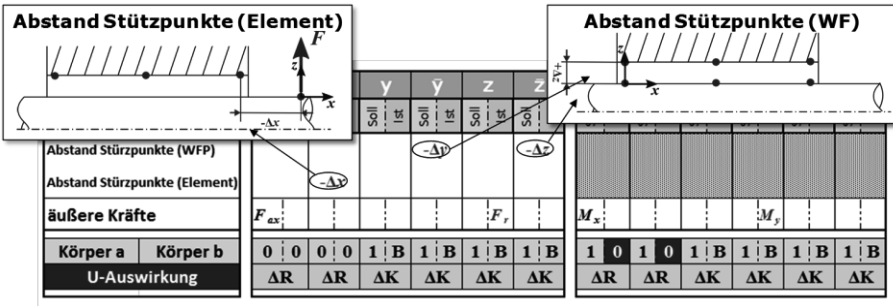


Bild 5: Abschätzung von Unsicherheitsauswirkungen

Unsichere Lastszenarien in Nutzungsprozessen können dagegen zu einer Veränderung der auftretenden Kräfte oder im Zusammenhang mit weiteren Abweichungen sogar zu ungewollten Bewegungsmöglichkeiten führen. Die auf das Beispielsystem einwirkende Radialkraft  $F_{rad}$  in z-Richtung führt zu einem resultierenden Moment  $M_y$ . Durch die Betrachtung des Abstands zwischen Kräfteinleitungspunkt und abstützender Fläche (vgl. Bild 5 links), können dabei eintretende Auswirkungen abgeschätzt werden.

## 4 Analyse von lasttragenden Systemen mit der UMEA Methodik

Die detaillierte Beschreibung von Wirkstrukturen stellt eine erforderliche Ergänzung für die Analyse von lasttragenden Systemen mit der UMEA Methodik dar. Durch die Berücksichtigung von unsicheren Einflussfaktoren in Produktions-, Montage- und Nutzungsprozessen sowie von Wirkzusammenhängen zwischen Produktkomponenten können die bestehenden Unsicherheitsverknüpfungen im Produktlebenslauf abgeleitet werden. Aufbauend auf dem 2. Schritt der UMEA *Unsicherheitsursachen identifizieren* ist die Methode dementsprechend dem 3. Schritt der UMEA *Unsicherheitsauswirkungen ermitteln* zuzuordnen (vgl. auch Bild 3). Ihre Anwendung im Ablauf der UMEA Methodik wird im Folgenden an einem im SFB 805 als Demonstrator entwickelten Dreibeinsystem [2] verdeutlicht.

### 4.1 UMEA Schritt 2: Identifizierung von unsicheren Einflussgrößen

Die Grundfunktion des in Bild 6 a) dargestellten Dreibeinsystems ist eine gleichmäßige Aufteilung der durch ein Zusatzgewicht aufgebrachten Kraft auf drei Stäbe durch das gewählte Verbindungskonzept. Mit Hilfe des einfachen, aus einem Verbindungsstück und drei im Verbindungsstück verspannten Beinen bestehenden Systems sollen dabei die bestehenden Unsicherheitsverknüpfungen im Produktlebenslauf illustriert werden [2].

Aufbauend auf der Festlegung relevanter Risikokriterien in UMEA Schritt 1 werden in UMEA Schritt 2 mögliche Unsicherheitsursachen identifiziert. Durch eine systematische Betrachtung der Produktions- und Montageprozessen (vgl. Bild 6 b) und c)) sind somit zunächst mögliche Einflussgrößen zu identifizieren, die sich auf die Kraftleitung, d. h. auf die Grundfunktion des Dreibeinsystems, auswirken.

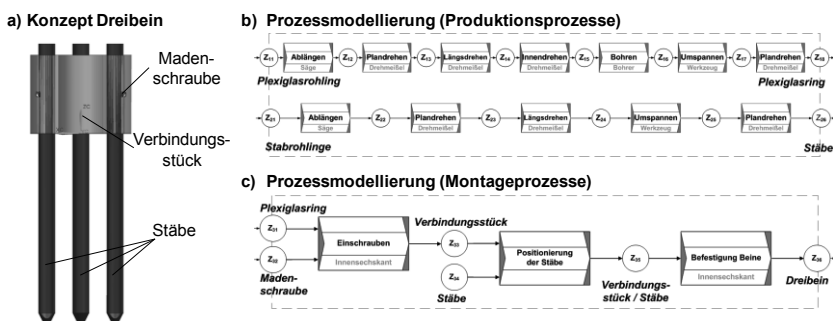


Bild 6: Dreibeinsystem a) und Lebenslaufprozesse b), c)

## 4.2 UMEA Schritt 3: Unsicherheitsauswirkungen ermitteln

In UMEA Schritt 3 werden anschließend mit Hilfe des in Abschnitt 3 vorgestellten Ansatzes mögliche Auswirkungen der identifizierten unsicheren Einflussgrößen ermittelt. Bild 7 zeigt zunächst die Charakterisierung der realisierten Schlussarten für das Dreibeinsystem. Bei der Montage werden die Stäbe in das Verbindungsstück eingeschoben, positioniert und mit Madenschrauben verspannt (vgl. auch Montageprozesse in Bild 6 c)). An der Schnittstelle zwischen Verbindungselement und Stab wirkt in x- und y-Richtung ein Kontaktkraftschluss (**K**). In Richtung der z-Achse durch ein aufgelegtes Zusatzgewicht aufgebrachte Kräfte werden durch den somit entstehenden Reibkraftschluss (**R**) übertragen.

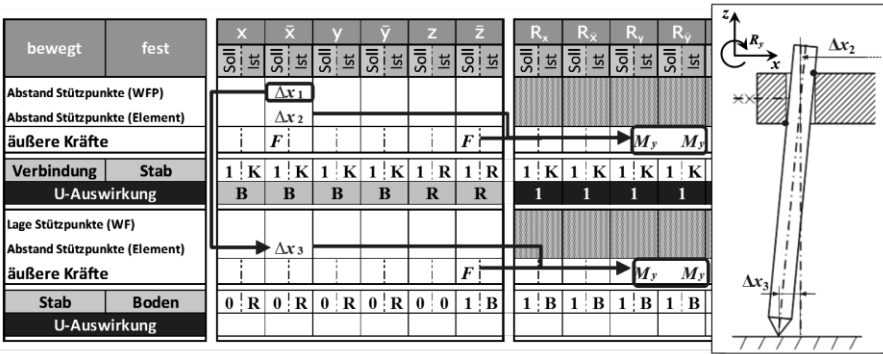


Bild 7: Analyse von Unsicherheitsauswirkungen

Auf den Beschreibungen der Wirkflächenpaare aufbauend werden anschließend bestehende Unsicherheitsverknüpfungen beschrieben und **Unsicherheitsauswirkungen** abgeleitet. Fertigungsabweichungen im Bohrprozess oder eine fehlerhafte Montage können beispielweise zu einem Spiel  $\Delta x_1$  zwischen Verbindungselement und Stab und somit zu einer Änderung der bestehenden Schlussart in x- sowie abhängig davon in y- und z-Richtung führen. Durch eine radiale Abweichung  $\Delta x_2$  der einzelnen Bohrungspositionen zueinander und dem hiermit verbundenen nicht mittigen Kraftangriff eines Zusatzgewichts kommt es gleichzeitig zu einem Moment  $M_y$ . Dieses führt zu einer Abweichung von einer gleichmäßigen Kraftverteilung im System. Zudem müssen Abhängigkeiten zwischen einzelnen unsicheren Einflüssen bzw. Auswirkungen auf nachfolgende Schnittstellen im System beachtet werden. Ein Spiel zwischen Verbindungselement und Stab kann zu einer Änderung der geplanten Stützflächen führen (vgl. Bild 7 rechts). Infolge der eintretenden

---

Schrägstellung der Stäbe in der Bohrung kommt es zu einer Abweichung der Stabposition am Boden  $\Delta x_3$ , die das Moment  $M_y$  weiter erhöht.

Die Analyse bestehender Unsicherheitsverknüpfungen bietet die Grundlage in UMEA Schritt 4, Konzepte lasttragender Systeme frühzeitig hinsichtlich eintretender Unsicherheitsauswirkungen zu bewerten und unterschiedliche Konzepte zu vergleichen. Änderungen von Schlussarten oder von Freiheitsgraden im System können insbesondere bei dynamischen Störgrößen, z. B. Vibrationen, verschleiß- bzw. korrosionsfördernd wirken. Gleiches gilt für eine nicht eindeutige Kraftleitung im System, die zu Verspannungen und somit ebenfalls zu erhöhtem Verschleiß an ungewollt belasteten Flächen führen kann. Die Einteilung von Unsicherheitsauswirkungen (z. B. Anzahl nicht optimal ausgelegter Schnittstellen im System, wirkender Einflüsse, geänderter Schlussarten oder entstehender Freiheitsgrade) kann zudem im Laufe der Entwicklung schrittweise verfeinert werden. Im Laufe der Konkretisierung zugrunde liegender Wirkstrukturen durch Geometriewerte, Materialien, etc. kann die Analyse bis hin zu einer vollständigen Quantifizierung aller wirkenden Kräfte detailliert werden.

## 5 Fazit und Ausblick

Der vorliegende Beitrag stellt eine Methode zur Beschreibung und Analyse von Unsicherheitsverknüpfungen im Lebenslauf lasttragender Systeme vor. Die Bedeutung der Zusammenhänge zwischen den durchlaufenen Lebenslaufprozessen, dem Produkt und seinem Verhalten in der Nutzung wird dabei auf Basis bestehender Gestaltungshinweise und verfügbarer Analysemethoden zur Sicherstellung der Produktqualität in Entwicklungsprojekten verdeutlicht. Die anschließend anhand von zwei Beispielsystemen erläuterte Methode bietet im Rahmen der UMEA Methodik die Möglichkeit, unsichere Kraftauswirkungen bei lasttragenden Systemen frühzeitig zu analysieren und Schwachstellen von Konstruktionskonzepten zu identifizieren.

Einschränkungen der erarbeiteten Methode ergeben sich aus den bei der Analyse bislang nicht berücksichtigten Einflussfaktoren. Die Analyse von Maßtoleranzen zur Beschreibung des Abstands zwischen Wirkflächen muss um entsprechende Form- und Lagetoleranzen erweitert werden. Diese beeinflussen ebenfalls die realisierten Schlussarten und können zu einer geänderten Kraftleitung in lasttragenden Systemen führen. Darüber hinaus sind auch externe Störgrößen zu berücksichtigen, die sich auf die Kraftverhältnisse auswirken können. Beispielsweise führen Temperatureinflüsse zu einer durch das Materialverhalten und die Ausgangsgeometrie bestimmten Änderungen von Abmaßen. Diese können zu Verspannungen, erhöhten Kräften und Verschleiß

---

im System führen [1], so dass entsprechende Einflüsse in Zukunft ebenfalls zu berücksichtigen sind.

## Danksagung

Die Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 805 "Beherrschung von Unsicherheit bei lasttragenden Systemen des Maschinenbaus" gefördert.

## Literatur

- [1] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.H.: "Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung". Springer-Verlag, 7. Auflage, Berlin Heidelberg, 2007.
- [2] Eifler, T.; Enss, G.C.; Haydn, M.; Mosch, L.; Platz, R.; Hanselka, H.: "Approach for a Consistent Description of Uncertainty in Process Chains of Load Carrying Mechanical Systems". Applied Mechanics and Materials, Vol. 104, 2012, S. 133-144.
- [3] Engelhardt, R.: "Uncertainty Mode and Effects Analysis – heuristische Methodik zur Analyse und Beurteilung von Unsicherheit in technischen Systemen des Maschinenbaus". Dissertation TU Darmstadt, VDI Verlag, Düsseldorf, 2013.
- [4] Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch, D.; Voßniek, J.: "Roloff/Matek Maschinenelemente". Vieweg+Teubner Verlag, 20. Auflage, Wiesbaden, 2011.
- [5] Hoenow, G.; Meißner, T.: "Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau". Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, München, 2010.
- [6] Matthiassen, B.: "Design for Robustness and Reliability". Dissertation Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Kopenhagen, 1997.
- [7] Ebro, M.; Howard, T.J.; Rasmussen, J.J.: "The Foundation for Robust Design – Enabling Robustness through Kinematic Design and Design Clarity". Proceedings of the International Design Conference – DESIGN'12, Dubrovnik, 2012, S. 817-826.
- [8] Söderberg, R.; Lindkvist, L.; Carlson, J.S.: "Managing Physical Dependencies through Location System Design". Journal of Engineering Design, Vol. 17, No. 4, S. 325-346.
- [9] Eifler, T.; Ebro, M.; Howard, T.J.: "A Classification of the industrial relevance of Robust Design". Erscheint in: Proceedings of the International Conference on Engineering Design – ICED'13, Seoul, 2013.

- 
- [10] Roth, K.: "Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band III Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung". Springer-Verlag, 2. Auflage, Berlin Heidelberg, 2007.



## Anwendung der Wertebereichsvariation am Beispiel des Energieversorgungssystems eines Satelliten

Thierry Sop Njindam<sup>1</sup>, Tanja Nemetzade<sup>2</sup>, Kristin Paetzold<sup>1</sup>, Roger Förstner<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institut für Technische Produktentwicklung  
Universität der Bundeswehr München*

<sup>2</sup>*Astrium GmbH  
81633 München*

<sup>3</sup>*Institut für Raumfahrttechnik  
Universität der Bundeswehr München*

### 1 Einleitung

Zwei philosophische Hauptströmungen haben das Maschinenzeitalter und zugleich den Weg für den Fortschritt heutiger technologischer Produkte geebnet und tiefgreifend geprägt. Zum einen basiert die *reduktionistische* Sichtweise auf der Überbetonung der Einzelelemente im System und vertritt die analytische Auffassung, dass jedes System zerlegbar und nichts anderes als die Summe seiner Einzelelemente ist. Dementsprechend lässt sich das Systemverhalten auf das Verhalten einzelner Elemente zurückführen [1], [2], [3]. Die *mechanistische Anschauung* bzw. der *Mechanizismus* bezeichnet die kausale Auffassung, wonach Abläufe, Ereignisse und Phänomene in deterministischen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen stehen [1], [3]. Dieses Weltbild entspricht dem Denken in geschlossenen Systemen.

---

Diese zwei Denkprinzipien besitzen auch in der heutigen Konstruktionsmethodik Gültigkeit. So baut das traditionelle Bottom-Up Vorgehen auf der Überzeugung auf, dass technische Systeme alleine durch Verknüpfungen von Einzelelementen entstehen. Demnach lässt sich das Systemverhalten auch aus den Verhalten seiner Einzelelemente erklären. Zweifelsohne hat dieses Vorgehen erhebliche Vorzüge, vor allem in der Anwendung von Baukastensystemen, Plattformstrategien oder in der Softwareentwicklung. Häufig anzutreffende Schwachstellen dieses Vorgehens sind auf Schnittstellen zwischen den Systemelementen zurückzuführen. Dennoch gab es immer Gegner dieses Prinzips, die nach dem Grundsatz des Aristoteles „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ das Ganze als Eigenständigkeit hervorhoben [3]. Es gibt außerdem keinen allgemeinen systematischen Ansatz zur Sicherstellung der Kompatibilität zwischen den Schnittstellen [4]. Systemanforderungen lassen sich nicht zwangsläufig durch Teilsystemanforderungen erfüllen, vor allem in komplexen Systemen, die sich durch emergente Eigenschaften auszeichnen.

Das integrative Top-Down Vorgehen, worauf sich die Systems Engineering Vorgehensweise stützt, orientiert sich hingegen nach dem Prinzip „vom Ganzen zum Detail“. Die Schnittstellen zwischen den Systemelementen und die Interaktion mit der umliegenden Umwelt spielen bei der Gestaltung des Systems, zusätzlich zu den Systemelementen selbst, eine tragende Rolle über den gesamten Lebenszyklus hinweg [2]. Die hierarchische Erfüllung der Anforderungen nach jeder Aktivität im Entwicklungsprozess ist, im Gegenteil zum vorher erwähnten Vorgehen, fester Bestandteil dieses Vorgehens (Top-Down). Dies birgt aber auch Schwachstellen: die frühzeitige Ermittlung der Verbindung zwischen den Anforderungen auf Systemebene und Designparametern diverser Hierarchieebenen wird nicht klar herausgestellt. Zudem ist die frühe Abschätzung des Einflusses von sensitiven Designparametern auf Anforderungen in diversen Hierarchieebenen nicht klar unterstrichen. Sie wäre jedoch bei der Suche möglicher Lösungen zum Designproblem sowie bei der Auslegung von Designparametern sinnvoll.

Angesichts dieser Erkenntnisse beabsichtigt der vorliegende Beitrag die Vorzüge beider Vorgehen zu verknüpfen. Unter dem Aspekt der ganzheitlichen Systembetrachtung wird die Top-Down basierte Suche nach Systemlösungen mit der Bottom-Up gestützten Auswirkung von Änderungen der Systemparameter unterer Hierarchieebenen mit den Performance-Anforderungen auf Systemebene in Beziehung gesetzt. Dabei spielt die Methodik der Wertebereichsvariation eine zentrale Rolle. Kapitel 2 widmet sich der Beschreibung dieser Methode. Sie wird auf den Entwurf der Energieversorgungseinheit eines Satellitensystems im darauffolgenden Kapitel 3 angewendet. Kapitel 4 fasst die Ergebnisse dieses Beitrags zusammen.

## 2 Methodisches Vorgehen

### 2.1 Ausgangssituation

Die systemtechnische Betrachtung technischer Gebilde stützt sich in der Konstruktionsmethodik auf eine hierarchische Betrachtung und Zerlegung des Gesamtproblems in einfache und damit handhabbarere Probleme [5]. Aus funktionaler Sicht wird die Gesamtfunktion in Teilfunktionen und die zwischen ihnen zu übertragenden Flüsse (Energie, Signal und Stoff) untergliedert. Dasselbe gilt aus physikalischer Sicht, wonach sich ein System in Teil- und Untersysteme beziehungsweise in Baugruppen, Bauteile und Parts untergliedern lässt (siehe Bild 1). Systemeigenschaften und –designparameter sowie Wechselwirkungen zwischen diesen werden in dieser Hinsicht definiert und bilden den potentiellen Lösungsraum ab.

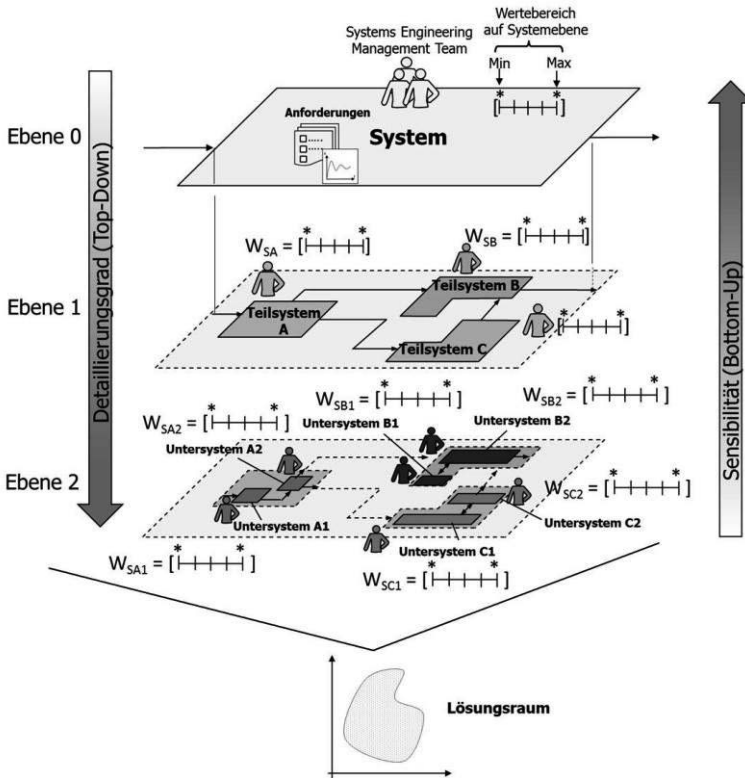


Bild 1: Hierarchische Struktur technischer Systeme in Anl. an [5] und [6]

## 2.2 Wertebereichsvariation

Auf Basis gegebener Systemanforderungen (funktionale und nicht-funktionale) und des Top-Down Vorgehens (siehe Bild 1) lassen sich die Systemeigenschaften hierarchisch ermitteln und rückverfolgen. Primäre Lösungen zum gestellten Problem werden hierbei bestimmt. Der inhärente Aspekt der Unsicherheit in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses stellt die Grundlage für die Variation von Wertebereichen von Design- und Performanceparametern. Unter Design- und Performanceparametern verstehen wir Parameter wie geometrische Größen oder Leistung, die ganz im Gegenteil zu „Noise“-Parametern, wie z.B. Fertigungsfehler, der Gestaltungsfreiheit des Konstrukteurs unterliegen. Gegenstand der Variation von Wertebereichen ist es, im Einklang mit spezifizierten Soll-Werten spezifische Lösungen zum Designproblem zu ermitteln und dabei die Bandbreite der Designparameter zu verfeinern. Verschiedene Strategien wie z.B. Fuzzy-Menge, Wahrscheinlichkeitsverteilungen oder Intervallarithmetik für den Umgang mit Unsicherheiten wurden in [7] vorgestellt. Die Intervallalgebra ist in Anbetracht der in den frühen Phasen dazugehörigen epistemischen Unsicherheit für die Wertebereichsvariation von zentraler Bedeutung. Die grundlegenden Operationen der Intervallalgebra werden im Rahmen der Lösung aufgestellter mathematisch-physikalischer Beziehungen verwendet und sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Grundlegende Operationen der Intervallalgebra

<b>Basierend auf den Designparametern <math>x</math> und <math>y</math>, in Intervallnotation wie folgt definiert: <math>x = [\underline{x}, \bar{x}]</math> mit unterer Grenze <math>\underline{x}</math> und oberer Grenze <math>\bar{x}</math> und <math>y = [\underline{y}, \bar{y}]</math> ebenfalls mit den begrenzenden Elementen <math>\underline{y}</math> als untere Grenze und <math>\bar{y}</math> als obere Grenze, gilt:</b>
$x + y = [\underline{x} + \underline{y}, \bar{x} + \bar{y}]$
$x - y = [\underline{x} - \bar{y}, \bar{x} - \underline{y}]$
$x \times y = [\min\{\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}\}, \max\{\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}\}]$
$\frac{1}{x} = [1/\bar{x}, 1/\underline{x}]$
$\frac{x}{y} = x \times \frac{1}{y}$ für $0 \notin y$

Nachträgliche Änderungen an den in den frühen Phasen gestellten Anforderungen sind generell nie auszuschließen. Mögliche Gründe hierfür sind so-

wohl vage und unpräzise Formulierungen, als auch gewisse unbekannte und meist unvollständige Informationen über die Umgebung, in der das System agiert. Auswirkungen dieser Änderungen auf andere Systemeigenschaften sind möglichst früh zu ermitteln. Wertebereiche werden diesbezüglich verfeinert oder gegebenenfalls erweitert. Diese Methodik wird in Bild 2 zusammengefasst. Sie wird im nächsten Abschnitt an der Energieversorgungseinheit eines Satelliten angewendet. Um den Rahmen dieses Beitrags nicht zu sprengen, liegt der Fokus im Anwendungsbeispiel auf den Schritten 5 und 6 der in Bild 2 dargestellten Methodik.

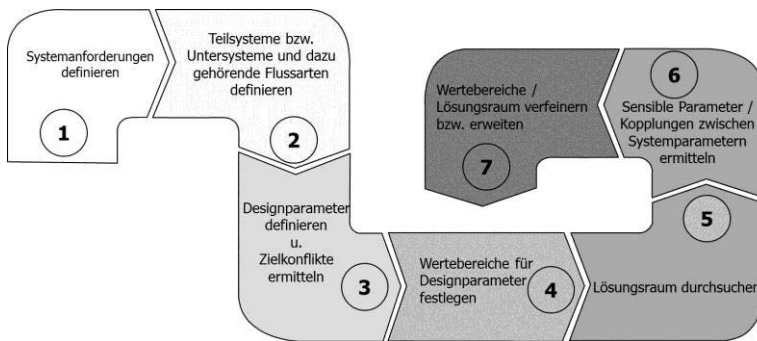


Bild 2: Methodik der Wertebereichsvariation

### 3 Anwendung am Beispiel eines Satellitensystems

Satelliten sind nicht nur hochkomplexe technische Systeme, sondern agieren auch unter extremen, nicht genau vorhersehbaren Umweltbedingungen, um ihre Funktion zu erfüllen. Hinzu kommt, dass es begrenzte Möglichkeiten gibt, das System im Betrieb zu korrigieren und ein Totalausfall mit sehr hohen Verlusten verbunden ist. Während des Entwurfs eines Satelliten muss daher eine Vielzahl von Anforderungen und Randbedingungen sorgfältig beachtet werden, die sich zudem auf verschiedene Ebenen (System-, Teilsystem- und Untersystemebene) beziehen. Dies erfordert zu jedem Zeitpunkt des Satelliten- und Missionsentwurfs einen ganzheitlichen Ansatz. Zielkonflikte auf Subsystemebene sind zudem nicht ausgeschlossen. Ferner unterliegen gerade in frühen Entwicklungsphasen Anforderungen einer gewissen Unsicherheit, die Änderungen im Satellitendesign nach sich ziehen können. Der sogenannte „Design Point“ des Satelliten – bestimmt durch einen ausgewählten, festgelegten Satz an Entwurfsparametern – ist folglich nicht starr, sondern ändert sich im Laufe des Satellitenlebenszyklus. In diesem Zusammenhang ist es aus der Designpraxis heraus im Allgemeinen hilfreich zu erfassen, wie sich Verän-

---

derungen auf Teilsystemebene (z.B. die Veränderung der Solarpanelfläche) auf Systemebene (z.B. auf die maximal vom Satelliten erreichbare Energieversorgungsleistung) auswirken. Mögliche Veränderungen in den Entwurfsparametern werden in Form von Wertebereichen modelliert. Dadurch wird eine Bottom-Up-Verifikation der Performanceanforderungen vorgenommen, welcher die Top-Down basierte Suche nach Designlösungen ergänzt.

Beispielhaft soll im Folgenden eine potentielle Interaktion zwischen dem Energieversorgungs- und Lageregelungssystem eines Satelliten im erdnahen, zirkularen Orbit angenommen werden. In erdnahen Missionen wird das Energieversorgungssystem eines Satelliten häufig durch ein photovoltaisches System in Form von Solarpanelen mit Solarzellen und Speichermedien wie Lithiumionenbatterien umgesetzt. Gerade die Größe der Solarpanele ist auch für die Lageregelung von Bedeutung. Diese tragen oft einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an der von der Restatmosphäre angeströmten Fläche bei und sorgen somit für eine Vergrößerung des Luftwiderstandes. Letzterer verursacht u.a. durch die Abbremsung des Satelliten eine Absenkung der Orbithöhe, was bis zum Absturz des Satelliten führen kann. Das Lageregelungssystem muss diesem Effekt mit treibstoffintensiven Orbitkorrekturmanövern entgegen wirken. Aus Sicht der Lageregelung kann also während der Satellitenentwicklung die Forderung aufkommen, die Solarpanele zu verkleinern, um den durch die Restatmosphäre verursachten Luftwiderstand zu verringern und damit weniger Orbitkorrekturmanöver fliegen zu müssen. Eine Verringerung der Solarpanelfläche resultiert jedoch gleichzeitig in einer Reduzierung der von den Panelen produzierten elektrischen Leistung, da durch die Verkleinerung weniger Solarzellen angebracht werden können. Die elektrische Leistung wird für den Betrieb des Satelliten und insbesondere der geflogenen Nutzlast benötigt. Deshalb kann die Solarpanelfläche nicht allein aus Sicht der Lageregelung verändert werden, sondern muss auch eine ausreichende Energieversorgung gewährleisten. Ferner kann es vorkommen, dass im Laufe der Satellitenentwurfsphase die Nutzlast, die oft parallel zum Satelliten entwickelt wird, mehr Energie als ursprünglich angenommen benötigt. Es kann sich während der Entwurfsphase auch herausstellen, dass eine andere oder zusätzliche Nutzlast geflogen werden soll. Hierfür ist es dann erforderlich, größere Solarpanele als ursprünglich entworfen zu fliegen. Diese Änderung hat wiederum einen Einfluss auf den verursachten Luftwiderstand und damit auf den Entwurf des Lageregelungssystems, welcher erfasst werden muss. Schließlich kann auch eine Änderung der Missionsanforderungen eintreten, die eine neue Ausrichtung des Satelliten im Orbit erfordert. Dies hat wiederum einen Einfluss auf die Orientierung der Solarpanele zur Sonne und die des Satelliten zur Restatmosphäre, welche die generierte elektrische Leistung und die Abbremsung des Satelliten beeinflussen.

---

Durch Variation der Breite der Solarpanelfläche  $b$  eines fiktiven Satelliten (siehe Bild 3) soll im Folgenden ermittelt werden, wie sich diese Parameteränderung auf den Luftwiderstand und die potentiell zu fliegende Nutzlast auswirkt und wie die Batterie als Energiespeicher entsprechend ausgelegt werden muss. Die von der Nutzlast geforderte elektrische Leistung  $P_{Nutzer}$ , die mit dem gegebenen Parametersatz maximal möglich ist, wird dabei als zentraler Performanceparameter auf Systemebene betrachtet. Diese Analyse wird für zwei verschiedene Satellitenausrichtungen, charakterisiert durch den Sonneneinfallswinkel  $\alpha$ , durchgeführt (siehe Bild 3). Die für die Berechnungen verwendeten Designparameter und ihre Wertebereiche gemäß Schritt 4 der oben erwähnten Methodik (siehe Bild 2) sind in Tabelle 2 dargestellt und an den fiktiven FireSat Satelliten aus [8] angelehnt. Der dargestellte Testfall basiert auf den folgenden Vereinfachungen und Annahmen:

- Das fiktive Missionsziel ist die Beobachtung eines Objektes im Universum. Dafür nimmt der Satellit eine inertielle Orientierung ein (siehe Bild 4), und vermeidet während eines Orbits die Sonnenblendung bei Annahme eines konstanten Sonneneinfallswinkels; der Sonnenvektor liegt dabei in der xz-Ebene des Satellitensystems.
- Der Satellit fliegt in einem zirkularen, äquatorialen Orbit mit konstanter Orbithöhe von 700 km (Low Earth Orbit).
- Alle Störeinflüsse bis auf den Luftwiderstand durch Restatmosphäre werden vernachlässigt.
- Die Sonnenaktivität und ihr Einfluss auf die Atmosphärendichte werden vernachlässigt. Für die Berechnungen wird eine konstante Atmosphärendichte basierend auf [9] angenommen.
- Die jahreszeitliche Variation der Sonneneinstrahlung wird vernachlässigt: für die Analyse wird der gemittelte Wert der Solarkonstante angenommen.
- Die Satellitengeometrie wird vereinfacht zu einem Würfel als Satellitenkörper und zwei gleichförmigen Solarpanelen.
- Für die Analyse findet ein vereinfachtes Solargeneratormodell mit Galliumarsenid-Zellen Verwendung; eine Degradation der Solarzellen über die Zeit wird vernachlässigt.
- Im vereinfachten Batteriemodell mit konstanter Leistungsentnahme wird die Anwendung der Lithium-Ionen Technologie angenommen.

Die Widerstandskräfte wie auch die generierte und gespeicherte elektrische Leistung hängen von der Position des Satelliten in seiner Umlaufbahn ab. Um eine Aussage über die Performance des Satelliten unabhängig von seiner Position im Orbit treffen zu können, muss eine orbitweise Betrachtung der berechneten Werte eingeführt werden.

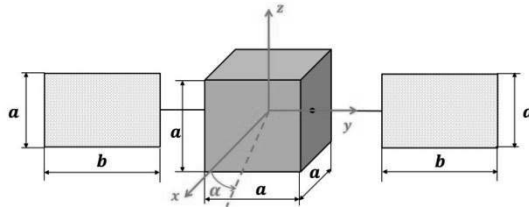


Bild 3: Satellitengeometrie mit Sonneneinfallswinkel  $\alpha$

Tabelle 2: Verwendete Parameter für Fallstudie

<b>Orbit</b>			
Orbithöhe	$h_{Orbit}$	700	km
Dichte der Atmosphäre bei $h_{Orbit}$ <sup>1</sup>	$\rho_{atm}$	$7.09 \cdot 10^{13}$	g/cm <sup>3</sup>
Solarkonstante	$S$	1376	W/m <sup>2</sup>
<b>Satellit</b>			
Masse	$m_{S/C}$	200	kg
Kantenlänge	$a$	1	m
Kantenlänge	$b$	[0.5;2.0]	m
Widerstandskoeffizient	$C_D$	2.2	-
Sonneneinfallswinkel	$\alpha$	0;30	°
<b>Batterie</b>			
Ladeeffizienz <sup>2</sup>	$\eta_{Laden}$	0.95	-
Entladeeffizienz <sup>2</sup>	$\eta_{Entladen}$	0.95	-
<b>Solarpanel</b>			
Zelleffizienz <sup>3</sup>	$\eta_{Zelle}$	0.185	-
Transfereffizienz <sup>3</sup>	$\eta_{Transfer}$	0.96	-
Inhärente Degradation <sup>3</sup>	$I_d$	0.77	-

<sup>1</sup>[9], <sup>2</sup>[10], <sup>3</sup>[8]

Für die Berechnung des Luftwiderstandes wurde der Umlauf in  $N = 100$  gleichmäßige Zeitschritte unterteilt, so dass die Satellitenpositionen im Orbit zum Zeitpunkt  $t_0$  und  $t_{100}$  zusammenfallen. Für jeden der verschiedenen Zeitschritte  $t_n$ ,  $n = 0, \dots, N - 1$  wurde anschließend gemäß [8] die Widerstandskraft  $F_{W,n} [N]$  bzw. die Abbremsung  $a_{W,n} [m/s^2]$  mit

$$F_{W,n} = a_{W,n} \cdot m_{S/C} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{atm} \cdot V^2 \cdot C_D \cdot A_{cross,n} \quad (1)$$

berechnet. Hierbei beschreibt  $V$  [m/s] die Geschwindigkeit des Satelliten und  $A_{cross,n}$  [m<sup>2</sup>] die projizierte Fläche des Satelliten, welche orthogonal zur Widerstandskraft steht. Der Verlauf der Widerstandskraft über einen Orbit ist in Bild 4 dargestellt und verdeutlicht, dass sich die in Widerstandsrichtung projizierte Fläche des Satelliten in einem Orbit kontinuierlich ändert.

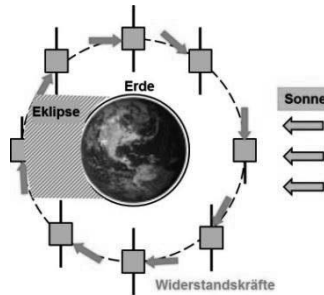


Bild 4: Satellit im Orbit

Anschließend werden diese Werte über alle Orbitschritte gemittelt mit

$$a_{W,d} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{99} a_{W,n} \quad (2)$$

Ferner berechnet sich nach [8] die von einem Solarpanel generierte elektrische Leistung zu jedem Zeitpunkt in der Sonnenphase des Orbits zu

$$P_{SG} = S \cdot A_{SG} \cdot \cos(\alpha) \cdot \eta_{zelle} \cdot I_d \cdot \eta_{Transfer} \quad (3)$$

mit  $A_{SG} = 2 \cdot a \cdot b$  als Solarpanelfläche.  $\eta_{zelle}$  berücksichtigt die Effizienz der Solarzellen, die inhärente Degradation  $I_d$  lässt u.a. Temperatureffekte einfließen und  $\eta_{Transfer}$  berücksichtigt Verluste, die durch die Regelung der elektrischen Leistung entstehen.

In demjenigen Abschnitt des Orbits, in dem der Satellit von der Sonne beschienen wird, versorgen die Solarpanele nicht nur die Nutzlast und die Satellitenplattform mit Energie, sondern laden auch die Batterien an Bord. Diese sind in der Eklipse, d.h. wenn der Satellit sich im Erdschatten befindet, für die elektrische Energieversorgung des Satelliten zuständig. Die in den Batterien gespeicherte Energie im sonnenbeschienenen Orbitabschnitt lässt sich ermitteln durch

$$E_{Bat,n} = E_{Bat,n-1} + (P_{SG} - P_{Nutzer}) \cdot \Delta t_{Laden} \cdot \eta_{Laden} \quad (4)$$

Für die Eklipse gilt

$$E_{Bat,n} = E_{Bat,n-1} - P_{Nutzer} \cdot \frac{\Delta t_{Entladen}}{\eta_{Entladen}} \quad (5)$$

Unter der Annahme, dass nur ein Umlauf im Orbit betrachtet wird, können die Gleichungen (3), (4) und (5) zusammengeführt werden zu

$$E_{Bat,100} = E_{Bat,0} + (P_{SG} - P_{Nutzer}) \cdot \Delta t_{Laden} \cdot \eta_{Laden} - P_{Nutzer} \cdot \frac{\Delta t_{Entladen}}{\eta_{Entladen}} \quad (6)$$

Dabei ist  $\Delta t_{Laden}$  mit der Dauer der Sonnenphase und  $\Delta t_{Entladen}$  mit der Dauer der Eklipse gleichzusetzen. Wird nun ferner angenommen, dass die Analyse startet, wenn der Satellit mit vollständig aufgeladener Batterie, d.h. mit der gespeicherten Energie  $E_{Bat,0} = E_{Bat,max} [Wh]$ , in den Erdschatten eintritt, und nach ihrer Entladung in der Eklipse vollständig wieder aufgeladen wird ( $E_{Bat,100} = E_{Bat,max}$ ), kann Gleichung (6) zum Ende eines Umlaufs geschrieben werden zu

$$(P_{SG} - P_{Nutzer}) \cdot \Delta t_{Laden} \cdot \eta_{Laden} = P_{Nutzer} \cdot \Delta t_{Entladen} \cdot \frac{1}{\eta_{Entladen}} \quad (7)$$

Mit  $P_{Nutzer}$  als zu ermittelndes Charakteristikum für die Performance des Satelliten kann Gleichung (7) umformuliert werden zu

$$P_{Nutzer} = P_{SG} \cdot \frac{\Delta t_{Laden} \cdot \eta_{Laden}}{\frac{\Delta t_{Entladen}}{\eta_{Entladen}} + \Delta t_{Laden} \cdot \eta_{Laden}} \quad (8)$$

Die dafür minimal erforderliche Batteriegröße wird anschließend entsprechend

$$E_{Bat,min} = P_{Nutzer} \cdot \frac{\Delta t_{Entladen}}{\eta_{Entladen}} \quad (9)$$

ohne den Effekt der Tiefenentladung zu berücksichtigen, ausgelegt.

Bild 5 und Bild 6 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen, wobei die Breite der Solarpaneele  $b$  in Schritte von 0.1 m verändert wurde. Der Design Point wird bei  $b = 1 m$  angenommen. Ferner ist anzumerken, dass zusätzlich zum Mittelwert  $a_{W,d}$  die in einem Orbit erreichte minimale und maximale Abbremsung  $a_{W,min}$  und  $a_{W,max}$ , die für die Auslegung des Lageregelungssystems von Bedeutung sein können, angegeben werden. Hierdurch soll ein detaillierteres Bild von der verursachten Abbremsung erzielt werden.

---

## 4 Diskussionen

Die Ergebnisse nach der Lösungsraumdurchsuchung (siehe 5. Schritt der Methodik in Bild 2) in Bild 5 und Bild 6 zeigen, dass die Variation der Solarpanelbreite  $b$  allgemein in lineare Verläufe der entsprechenden ermittelten Parameter mündet. Für die Größen des Energieversorgungssystems  $P_{SG}$ ,  $P_{Nutzer}$  und  $E_{min}$  war dies durch den deutlich in  $b$  linearen Charakter der Gleichung (3) a priori ersichtlich. Der lineare Verlauf der durchschnittlichen und maximalen Abbremsung  $a_{W,d}$  und  $a_{W,max}$  lässt sich in der Wahl des zirkularen Orbits, der inertialen Ausrichtung des Satelliten und seiner symmetrischen Form begründen. Ferner ist die minimale Abbremsung  $a_{W,min}$  unabhängig von  $b$ , da diese genau dann auftritt, wenn die Anströmung parallel zur y-Achse des Satelliten verläuft. In dieser Position tragen die Solarpanele nicht zu der Widerstand erzeugenden Fläche bei.

Bezogen auf den 6. Schritt (Ermittlung von Kopplungen zwischen Systemparametern) der Methodik der Wertebereichsvariation in Bild 2, lassen Bild 5 und Bild 6 vermuten, dass eine Variation in  $b$  eine stärkere Auswirkung in  $P_{SG}$  als in  $P_{Nutzer}$  verursacht, ausgedrückt durch eine größere Steigung der entsprechenden Geraden. Entsprechendes gilt für  $a_{W,d}$  und  $a_{W,max}$ . Es ergibt sich jedoch ein klareres Bild, wenn die Abweichung der Werte zum Design Point in  $b = 1m$  nicht mehr absolut, sondern relativ untersucht wird: im Falle  $\alpha = 0^\circ$  ändern sich für jede Änderung von  $b$  um 0.1m, also um 10% bezogen auf den Design Point, die Werte  $P_{SG}$ ,  $P_{Nutzer}$  und  $E_{min}$  um ebenfalls 10%. D.h. mit einem Solarpanel mit 0.5m Breite, also 50% kleiner als im Design Point, werden je ein  $P_{SG}$ ,  $P_{Nutzer}$  und  $E_{min}$  erreicht, welche ebenfalls um 50% kleiner sind als im Design Point. Im Vergleich ändert sich die durchschnittliche Abbremsung  $a_{W,d}$  je Variationsschritt in  $b$  um 5.1%, die maximale Abbremsung  $a_{W,max}$  um 5.8%. Im Falle  $\alpha = 30^\circ$  ändern sich für jede Änderung von  $b$  um 0.1m, die Werte  $P_{SG}$ ,  $P_{Nutzer}$  und  $E_{min}$  um ebenfalls 10%. Die durchschnittliche Abbremsung ändert sich je Variationsschritt in  $b$  um 4.2%, die maximale Abbremsung um 4.9%. Sie weist dadurch also kleinere Veränderungen auf als im Fall  $\alpha = 0^\circ$ .

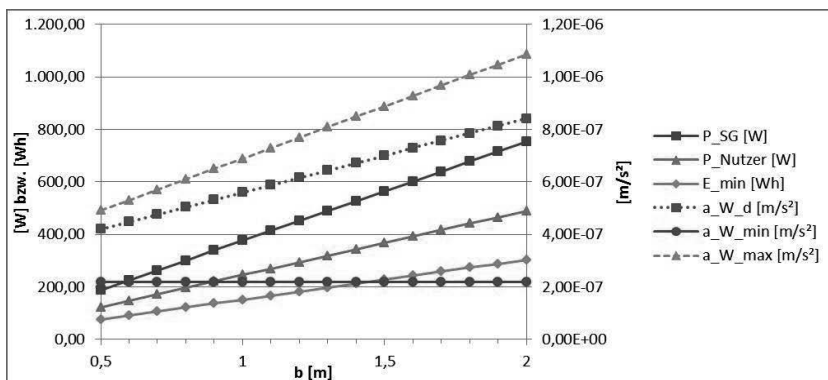


Bild 5: Ergebnisse der Analyse für  $\alpha = 0^\circ$

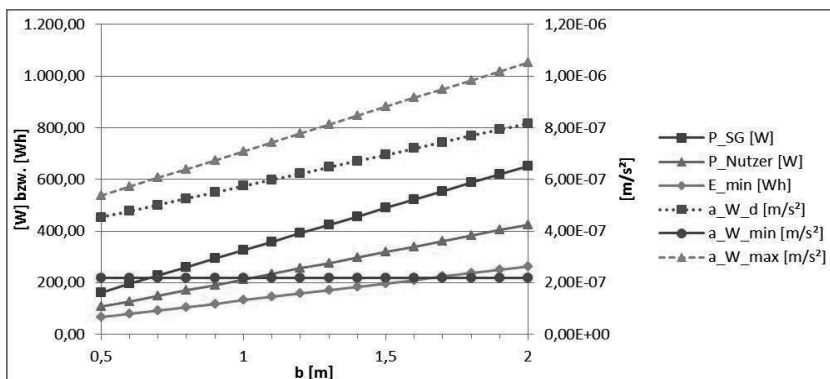


Bild 6: Ergebnisse der Analyse für  $\alpha = 30^\circ$

Werden nun einzig die Effekte durch die Variation des Sonneneinfallswinkels  $\alpha$  analysiert (es werden also die Ergebnisse für  $\alpha = 0^\circ$  und  $\alpha = 30^\circ$  bei jeweils gleichem  $b$  gegenübergestellt), so ergeben sich für jedes  $b$  um 13.4% kleinere Werte für die Größen des Energieversorgungssystems bei  $\alpha = 30^\circ$  im Vergleich zu  $\alpha = 0^\circ$ . Dies ist direkt auf den Kosinusterm in Gleichung (3) zurückzuführen. Für die Abbremsung sind die zu beobachtenden Änderungen abhängig von  $b$ . Für die Geometrien mit  $b \leq 1.3 m$  sind für die Ausrichtung  $\alpha = 30^\circ$  größere Abbremsungen als für  $\alpha = 0^\circ$  festzustellen. Die Veränderungen sind maximal für  $b = 0.5m$  (+7.8% für  $a_{W,d}$  bzw. +9.4% für  $a_{W,max}$ ). Für  $b \geq 1.4m$  werden die Abbremsungen für  $\alpha = 30^\circ$  kleiner als

---

für  $\alpha = 0^\circ$ . Die Veränderungen sind maximal für  $b = 2m$  (-2.8% für  $a_{W,d}$  bzw. -3.1% für  $a_{W,max}$ ).

Für die Auslegung des Satelliten bedeuten diese Ergebnisse, dass eine Änderung in der Solarpanelbreite für die untersuchten Ausrichtungen einen ungefähr doppelt so großen Einfluss auf die elektrischen Leistungsparameter ausübt als auf die verursachte Abbremsung durch die Restatmosphäre. Eine allgemeine Aussage des Einflusses der Panelbreite auf die Größen des Energieversorgungssystems ist somit unabhängig von der Geometrie des Satellitenkörpers oder der Ausrichtung des Satelliten möglich. Dies ist zurückzuführen auf den deutlich in  $b$  linearen Charakter der Gleichung 2. Da  $P_{SG}$  proportional in die Gleichungen 8 und 9 einfließt, bleibt der Einfluss von  $b$  in seiner linearen Ausprägung für  $P_{Nutzer}$  und  $E_{min}$  bestehen. Die Abhängigkeit der Abbremsung des Satelliten von der Panelbreite ist nicht eindeutig zu beschreiben, da diese abhängig von der Ausrichtung des Satelliten und der Geometrie des Satellitenkörpers ist.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die vorgestellten Ergebnisse Parameterzusammenhänge wiedergeben, welche eine Beurteilung der Tragbarkeit der Veränderungen nicht ersetzen. Einer 5%igen Änderung in der Abbremsung soll vorab nicht weniger Signifikanz zugesprochen werden als einer 10%igen Änderung in den Energieparametern. Sollte also die Notwendigkeit aufkommen den Design Point zu ändern, so müsste erwogen werden, ob eine Verkleinerung der Solarflächen einen signifikanten Gewinn für die Lageregelung hervorbringt, da dadurch Einbußen in der elektrischen Leistung hingenommen werden müssen. Gleichzeitig muss im Falle einer Vergrößerung der Solarpaneele zur elektrischen Leistungssteigerung untersucht werden, welche effektiven Konsequenzen die höhere Abbremsung für die Auslegung des Lageregelungssystems verursacht.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Methodik der Wertebereichsvariation basierend auf der Intervallalgebra wird im vorliegenden Beitrag vorgestellt. Dabei werden die Vorzüge von Top-Down und Bottom-Up Vorgehen verknüpft. Ziel hierbei ist es, die Auswirkung von Designparameteränderungen der unteren Hierarchieebene auf Systemanforderungen und –designparameter bei der Durchsuchung von Systemlösungen zu ermitteln. Die Umsetzung bei der Auslegung eines Satelliten hat gezeigt, dass eine Änderung der Solarpanelbreite einen ungefähr doppelt so großen Einfluss auf die Energieleistungsparameter besitzt als auf die durch die Restatmosphäre verursachte Abbremsung des Satelliten. Der Einfluss der

---

Panelbreite auf die Größen des Energieversorgungssystems ist für den untersuchten Testfall unabhängig von der Geometrie des Satellitenkörpers oder der Ausrichtung des Satelliten. Diese Aussage gilt nicht für die Abhängigkeit zwischen der Panelbreite und dem Luftwiderstand. Für die Änderung des Design Points wird angeraten, zusätzlich zu der Einbeziehung der vorgestellten Parameterzusammenhänge eine Beurteilung der tatsächlichen Tragbarkeit der absoluten Veränderungen durchzuführen. Im weiteren Vorgehen ist eine Berücksichtigung mehrerer Designziele wie z.B. Robustheit und Zuverlässigkeit geplant. Dabei wird der Fokus auf das Ausfallverhalten gelegt.

## Literatur

- [1] Hubka, V. und Eder, W.E.: "Theory of Technical Systems: A Total Concept Theory of Engineering Design", Springer Verlag, München, 1988.
- [2] Blanchard, B.S. und Fabrycky, W.J.: "Systems Engineering and Analysis", 5. Auflage, Prentice Hall, 2011.
- [3] Patzak, G.: „Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme – Grundlagen, Methoden, Techniken“, Springer Verlag, Wien, 1982.
- [4] Dyas, S.P.: "A Unified Theory of Engineering Design", MS Thesis, Texas A&M University, 2005.
- [5] Pahl, G; Beitz, W. et al.: „Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen“, Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [6] Aughenbaugh, J.M. und Paredis, C.J.J.: "The Role and Limitations of Modeling and Simulation in Systems Design", ASME International Engineering Congress 2004, Anaheim, USA, 2004.
- [7] Antonsson, E.K., und Otto, K.N.: "Imprecision in Engineering Design", ASME Journal of Mechanical Design 117, S. 25-32, 1995.
- [8] W.J. Larson und J.R. Wertz (Hrsg.), "Space Mission Analysis and Design", 3. Auflage, Springer, New York, 1999.
- [9] ESA ECSS-E-ST-10-04C Space Engineering: Space Environment, Noordwijk, The Netherlands, ESA-ESTEC, 2008.
- [10] Ley, W., Wittmann, K. und Hallmann, W. (Hrsg.): „Handbuch der Raumfahrttechnik“, 4. Auflage, München, Hanser, 2011

## **Design for Value Chain – Erste Praxiserfahrungen einer Methodenentwicklung und – einführung**

Markus Richter, Marc Griesbach, Jörg Dalhöfer  
*Dräger Safety AG & Co. KGaA*

(dieser Beitrag ist im Nachdruck zum Tagungsband enthalten)



## **Konstruieren mit generativen Fertigungsverfahren – Gestalterische Lösungen für die Substitution von Serienbauteilen**

Bastian Leutenecker, Quentin Lohmeyer, Mirko Meboldt  
*pd/z – Product Development Group Zurich*  
*Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich*

Additive manufacturing is a layer-based production process to generate three-dimensional physical objects directly from 3D-CAD data. Compared to conventional production processes additive technologies provide the opportunity to realize even complex geometries in a single manufacturing step. Due to this additive manufacturing allows the cost-effectively realization of series parts characterized by a high level of functional integration. This paper exemplary illustrates a substitution design that beneficially solved a real design practice problem. Using this example it is explained, which objectives had to be achieved, due to which reason which additive technology was selected, how the design was finally adapted and which technical and economic advantages and disadvantages resulted from this design adaption.

### **1 Einleitung**

Generative Fertigungsverfahren sind Verfahren, bei welchen dreidimensionale Bauteile direkt auf Basis von CAD-Modellen schichtweise hergestellt werden. Die Fertigung erfolgt dabei zumeist aus einem formlosen (Flüssigkeit, Pulver) oder formneutralen (Band, Draht) Ausgangsmaterial, das schichtweise aufgebracht und lokal verfestigt wird. In der Konstruktion haben sich generative Fertigungsverfahren insbesondere zur schnellen Herstellung von Konzeptmodellen und Funktionsprototypen etabliert (Rapid Prototyping). Die stetige Weiterentwicklung der generativen Fertigungstechnologien erlaubt heut-

---

zutage zudem die direkte Herstellung einbaufertiger Serienbauteile (Rapid Manufacturing) [1]. Im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren bieten generische Verfahren die Möglichkeit auch komplexe Bauteilgeometrien in einem einzigen Fertigungsschritt umzusetzen. Es ergeben sich so enorme Potentiale, Funktionen gestalterisch zu integrieren und folglich die Teileanzahl deutlich zu reduzieren. Durch die Substitution konventionell gefertigter durch generativ gefertigte Bauteile können so nicht nur Kosten gesenkt, sondern insbesondere auch Bauraum und Gewicht eingespart werden. Ein weiterer Vorteil besteht in der hohen Flexibilität. Da generative Verfahren kein Formwerkzeug erfordern, sind gestalterische Änderungen schnell und oftmals sogar ohne zusätzliche Aufwände umsetzbar.

## 2 Generative Fertigungsverfahren

Der schichtweise Aufbau dreidimensionaler Bauteilstrukturen kann auf verschiedene Weise realisiert werden. Gebhardt [2] gibt einen guten Überblick über die Bandbreite der technologischen Grundprinzipien, die den generativen Fertigungsverfahren zugeordnet werden. Trotz der Vielfalt an Verfahren werden für den Einsatz in der industriellen Praxis derzeit insbesondere das Fused Deposition Modeling, das 3D Printing und das Selektive Lasersintern/Laserschmelzen diskutiert. Im Folgenden werden diese drei generativen Verfahren sowie ihre wesentlichen Vor- und Nachteile kurz vorgestellt.

Beim Fused Deposition Modeling (FDM) verflüssigt eine im Bauraum frei verfahrbare, beheizte Extrudierdüse ein drahtförmiges Kunststoffmaterial (zumeist ABS). Das Ausgangsmaterial wird dabei ähnlich dem Prinzip einer Heißklebepistole linienweise aufgetragen [3]. Das definiert aufgebrachte Volumen verfestigt dabei durch Ableitung der eingebrachten Wärme in das Bauteil. FDM-Maschinen sind relativ günstig und kompakt, jedoch beschränkt hinsichtlich Qualitätskriterien wie Festigkeit oder Genauigkeit. Im Vergleich zu den anderen beiden Verfahren bietet FDM zudem nicht die Möglichkeit auch metallische Bauteile aufbauen zu können.

3D Printing (3DP) ist ein Fertigungsverfahren, bei welchem Bauteile generativ erzeugt werden, indem Granulate aus beliebigen Feststoffen mit einem zunächst flüssigen Binder zu einer festen Struktur, dem sogenannten Grünling, zusammengefügt werden. Die Verfestigung des Binders erfolgt mittels eines chemischen Aktivators, der – entsprechend des Grundprinzips eines Tintenstrahldruckers – selektiv aufgetragen wird [4]. Bei metallischen Werkstoffen erfolgen in anschließenden Prozessschritten das Entfernen des Binders, das Sintern sowie das Infiltrieren mit einer niedrig schmelzenden Legierung (z.B. Bronze). Ein wesentlicher Vorteil von 3D Printing ist darin begrün-

---

det, dass diese Technologie neuartige Möglichkeiten eröffnet, die Materialien eines Bauteils lokal anforderungsgerecht „komponieren“ zu können. Ein grundlegender Nachteil besteht jedoch in der Notwendigkeit die gedruckten Bauteile, z.T. auch mit relativ hohem Aufwand, nachbearbeiten zu müssen.

Beim selektiven Lasersintern (SLS) bzw. selektiven Laserschmelzen (SLM) wird mittels der durch einen Laser lokal eingebrachten Energie ein Granulat aus Kunststoff, Metall und/oder Keramik teilweise bzw. vollständig aufgeschmolzen und wieder verfestigt. Im Gegensatz zu klassischen Sinterprozessen wird bei SLS-Prozessen kein zusätzlicher Druck von aussen aufgebracht, was zu einer leicht porösen Bauteilstruktur führt [2]. Da dies bei metallischen Bauteilen zumeist unerwünscht ist, wird das Granulat hier in der Regel vollständig aufgeschmolzen. SLS- bzw. SLM-Bauteile zeichnen sich durch eine recht hohe mechanische und thermische Belastbarkeit aus, die jedoch nur erzielt werden kann, wenn die Maschinenparameter spezifisch auf den verwendeten Werkstoff sowie die geometrischen Besonderheiten des jeweiligen Bauteils abgestimmt sind.

Im Bereich der generativen Fertigung werden derzeit diverse Forschungsprojekte durchgeführt. Ein wesentlicher Schwerpunkt sind dabei insbesondere Untersuchungen hinsichtlich der fertigungstechnischen Möglichkeiten und Grenzen der spezifischen Technologien. Im Vordergrund stehen hier primär die Bewertung messbarer Qualitätskennwerte, wie Oberflächengüte oder Maßhaltigkeit. Beispielsweise nutzen Reinhardt und Witt [5] zur Beurteilung der Qualität eines Laser-Sinterprozesses eine definierte Prüfkörpergeometrie, durch die spezifische Qualitätskennwerte, wie z.B. erreichbare Wanddicken oder Radien, quantitativ erfasst und so die Einflüsse von Störgrößen auf verschiedene Bauteillagen bzw. -orientierungen untersucht werden können.

Aus Sicht der Konstruktion stellt sich zunächst jedoch vielmehr die Frage, wie das Potential additiver Fertigungsverfahren in spezifischen konstruktiven Problemstellungen gestalterisch umgesetzt werden kann. Die meisten Konstrukteure sind auf Basis ihrer Erfahrung mit Rapid Prototyping heutzutage vertraut mit dem Grundprinzip generativer Fertigungsverfahren und wissen um die grundsätzlichen Vorteile, die sich durch ihren Einsatz bieten. Trotz dieses allgemeinen Wissens ist dem Konstrukteur zumeist jedoch nicht klar, welche seiner Bauteile er durch generativ gefertigte Elemente ersetzen, welches Verfahren genau er dafür nutzen und in welcher Art und Weise er seine Gestaltung anpassen sollte. Hier bedarf es neuer methodischer Ansätze, die den Konstrukteur bei der Planung und Gestaltung von Bauteilsubstitutionen bedarfsgerecht unterstützen.

---

### 3 Forschungsbedarf und Zielsetzung

Generative Fertigungsverfahren beinhalten ein enormes Potential integrierte Funktionalität mittels komplexer Bauteilgeometrien auch in Serienprodukten wirtschaftlich umsetzen zu können. Zwar basiert dieses Potential direkt auf der stetig wachsenden Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Fertigungsprozesse, der Schlüssel das Potential generative Fertigungsverfahren vollständig erschließen zu können, liegt jedoch in der Konstruktion. Erst wenn der Konstrukteur bereit ist, sich in seinem Denken von den gestalterischen Beschränkungen konventioneller Fertigungsverfahren zu lösen, kann er die Fähigkeit entwickeln, Bauteile zu gestalten, in welchen die vielfältigen Vorteile generativer Fertigungsverfahren zum Tragen kommen.

Erste Untersuchungen im Umfeld mittlerer und großer Schweizer Unternehmen haben ergeben, dass der Großteil derzeit generativ gefertigter Bauteile im Prototypenbau eingesetzt wird. Nur ein Anteil von etwa 10% dient dem direkten Einsatz in Kundenendprodukten. Des Weiteren ist zu erkennen, dass – in den Fällen, in denen konventionell gefertigte Bauteile durch generativ gefertigte substituiert werden – zunächst oftmals keine gestalterischen Anpassungen vorgenommen werden, und so zwar die neuen Fertigungstechnologien, nicht aber das damit einhergehende Potential genutzt wird.

Hinsichtlich des Konstruierens mit generativen Fertigungsverfahren herrscht bislang noch ein relativ hohes Maß an Unsicherheit. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass sich durch diese Verfahren völlig neue Lösungsräume eröffnen, d.h. sich plötzlich gestalterische Lösungen als zielführend erweisen, die bislang als grundsätzlich nicht zulässig eingestuft wurden. Ein Beispiel: Fertigungsgerechtes Gestalten strebt durch konstruktive Maßnahmen u.a. eine Minimierung der Fertigungskosten an. Die nun durch generative Verfahren gegebene Möglichkeit, über eine Erhöhung der Bauteilkomplexität Kosten einzusparen, erscheint erst einmal ungewohnt und erfordert zunächst ein Umdenken des Konstrukteurs [6].

Ein zweiter Grund für die herrschende Unsicherheit besteht in dem unvollständigen Wissen über die Grenzen generativer Technologien. Trotz ihrer eindeutigen Vorteile werden generative Verfahren die konventionellen nicht vollständig ersetzen können. Vielmehr sollen diese gezielt an den richtigen Stellen zum Einsatz kommen. Es ist daher die Aufgabe der Konstruktions- und Entwicklungsmethodik den Konstrukteur durch entsprechende Methoden und Werkzeuge dabei zu unterstützen, genau die Bauteile in Serienprodukten zu identifizieren, bei welchen die Substitution durch generativ gefertigte Bauteile mit einem klar erkennbaren technisch-wirtschaftlichen Nutzen einhergeht.

---

## 4 Lösungsansatz

Der hier vorgestellte Lösungsansatz beinhaltet die grundlegende Idee anhand von ausgewählten Fallbeispielen aufzuzeigen, wie, ausgehend von realen Problemstellungen aus der industriellen Praxis, gestalterische Lösungen für die Substitution durch generativ gefertigte Serienbauteile entwickelt und umgesetzt werden. Die einzelnen Fallbeispiele sollen dabei im Idealfall die Darstellung des jeweiligen technischen Systems im Ausgangszustand (d.h. die Umsetzung mit konventionell gefertigten Bauteilen) sowie eine Beschreibung der konstruktiven Lösung mit generativ gefertigten Bauteilen beinhalten. Anhand dessen kann dann fallspezifisch erläutert werden, welche Zielsetzung erfüllt werden sollte, aus welchem Grund welches generative Fertigungsverfahren ausgewählt wurde, wie die detaillierte Ausgestaltung erfolgte und welche technischen und wirtschaftlichen Vorteile, aber auch welche Nachteile, mit der umgesetzten Bauteilsubstitution einhergegangen sind.

Der Ansatz bietet somit eine Orientierungshilfe für die Planung, dient aber auch als Lösungskatalog für die gestalterische Umsetzung. Durch die Betrachtung und die bewusste Auseinandersetzung mit den vorgestellten Lösungen soll es dem Konstrukteur so möglich sein, ein Gefühl für die situationsgerechte Auswahl und Verwendung generativer Fertigungsverfahren zu entwickeln und so besser einschätzen zu können, in welchen Fällen wie viel Kosten, Bauraum und Gewicht durch eine Bauteilsubstitution eingespart werden kann. Die Darstellung von Ausgangszustand und Entwicklungskontext (z.B. Stückzahlen, Stückkosten, Belastungsfälle, Änderungszyklen, etc.) soll dabei die Übertragung auf eigene individuelle Problemstellungen erlauben und so die bedarfsgerechte Bereitstellung von Informationen zur Gestaltung und Auslegung generativ gefertigter Bauteile ermöglichen.

In diesem Beitrag werden zunächst als Ausgangspunkt der anschließenden Betrachtungen vier allgemeine Potentialcluster für die Konstruktion mit generativen Fertigungsverfahren definiert. Diese bieten eine erste konstruktionsorientierte Hilfestellung zur Identifikation substituierbarer Bauteile. Ausgehend davon wird dann anhand des ausgewählten Fallbeispiels eines Reflektorhalters aus einem medizintechnischen Serienprodukt erläutert, aus welchen Gründen in diesem spezifischen Fall ein generatives Fertigungsverfahren genutzt wurde und in welchen Entwicklungsstufen durch gestalterische Maßnahmen schrittweise die zuvor beschriebenen Potentiale erzielt wurden. Das Fallbeispiel gibt einen Einblick in die Gestaltungsmöglichkeiten, die sich durch die Verwendung generativer Verfahren ergeben, zeigt aber auch die Unsicherheiten auf, die mit dieser grundlegend anders verfahrenen Fertigungstechnologie einhergehen.

---

## 5 Potentiale generativ gefertigter Bauteile

Eine wesentliche Voraussetzung für die frühzeitige Identifikation von, für die Substitution geeigneten, Bauteilen bzw. Baugruppen besteht in dem Wissen um die grundlegenden Potentiale, die generative Fertigungsverfahren bieten. Aus der Sicht der Konstruktion heraus können diese Potentiale in die folgenden vier Potentialcluster zusammengefasst werden, wobei jeder Cluster durch einen spezifischen „Design for X“-Aspekt charakterisiert ist.

*Design for Functional Integration:* Durch gestalterische Maßnahmen zur Funktionsintegration kann die Teilezahl einer Baugruppe deutlich reduziert werden. Da durch die damit einhergehende Zunahme der Bauteilkomplexität bei generativen Technologien keine zusätzlichen Aufwände entstehen, können so die Kosten in Summe gesenkt werden. Neben der Möglichkeit mehrere Bauteile zu einem einzigen Bauteil zusammenzufassen, kann der Konstrukteur zudem neue Funktionen, z.B. durch integrierte Kühlkanäle, vorsehen. Ein weiterer Vorteil ist hier auch darin zu sehen, dass gerade komplexe innere Geometrien einen zusätzlichen Plagiatsschutz bieten.

*Design for Lightweight Structures:* Im Kontext der Leichtbaukonstruktion werden Bauteilstrukturen mit dem Ziel einer Gewichtsreduktion optimal an die jeweilig auftretenden Belastungsfälle angepasst. Die hohe Gestaltungsfreiheit der generativen Fertigung erlaubt hier die direkte Umsetzung der mit Hilfe von Strukturoptimierungsverfahren errechneten Leichtbaustrukturen [7]. Zudem besteht die Möglichkeit die richtungsabhängigen Materialeigenschaften generativ gefertigter Bauteilen gezielt auszunutzen.

*Design for Individualization:* Grundansatz der variantenreichen Serienproduktion ist es, einen Kompromiss zwischen hoher Produktivität und ausreichender Befriedigung individueller Kundenbedürfnisse zu finden. Da generative Fertigungsverfahren ohne teure Formwerkzeuge auskommen, erlaubt diese Technologie die notwendige Flexibilität, um schnell und gleichzeitig wirtschaftlich bestehende Konstruktionen an individuelle Kundenwünsche (z.B. durch andere oder zusätzlich verbaute Komponenten) anzupassen.

*Design for Performance:* Eine Steigerung der Leistungsfähigkeit kann insbesondere bei durchströmten Bauteilen, wie z.B. Hydraulikblöcken, erreicht werden. Generative Verfahren erlauben die Umsetzung auch komplexer, strömungsoptimal gestalteter Kanäle. Zudem kann durch die Gestaltung integrierter Kühlrippen oder Kühlkanälen die Abführung von thermischer Energie verbessert und so die Leistungsfähigkeit von Produkten, wie z.B. Extrusionsdüsen, deutlich erhöht werden.

## 6 Fallbeispiel: Stoßwellenkopf

Bei dem in diesem Beitrag vorgestellten Bauteil handelt es sich um den Reflektorhalter (Bild 1) eines Stoßwellen-Therapiesystems für den orthopädischen Anwendungsbereich. In der Nutzung wird der, die Stoßwellen erzeugende, Stoßwellenkopf durch den Arzt an das Gewebe des zu behandelnden Körperteils angepresst und ausgelöst. Die durch den Kontakt in das Gewebe eingeleiteten und dort fokussierten Stoßwellen regen lokal eine erhöhte Stoffwechselaktivität an und können so den Heilungsprozess unterstützen.

Die größte Herausforderung bei der Konstruktion des Systems bestand in den hohen Anforderungen hinsichtlich Bauraum und Gewicht. Ziel war es einen möglichst leichten und kompakten Stoßwellenkopf zu entwickeln, der vom Bediener über den gesamten Behandlungszeitraum mit einer Hand gehalten werden kann, und sich so von der nächstgrößeren Baureihe abgrenzt. Die Erzeugung der Stoßwellen erfolgt durch eine Hochvoltentladung im Wasser zwischen zwei einstellbaren Elektroden. Die erzeugten Wellen werden durch einen Reflektor gebündelt, so dass der Fokuspunkt im zu behandelnden Gewebe liegt. Aufgrund der Notwendigkeit sowohl die bei der Entladung entstehenden Gase abzuführen, als auch kontinuierlich Wasser zuzuführen, wurde die Entscheidung getroffen den Reflektorhalter generativ zu fertigen. Es sollte so eine strömungsoptimale Konstruktion der Gaskanäle bei gleichzeitiger Einhaltung der Bauraum- und Gewichtsrestriktionen ermöglicht werden.

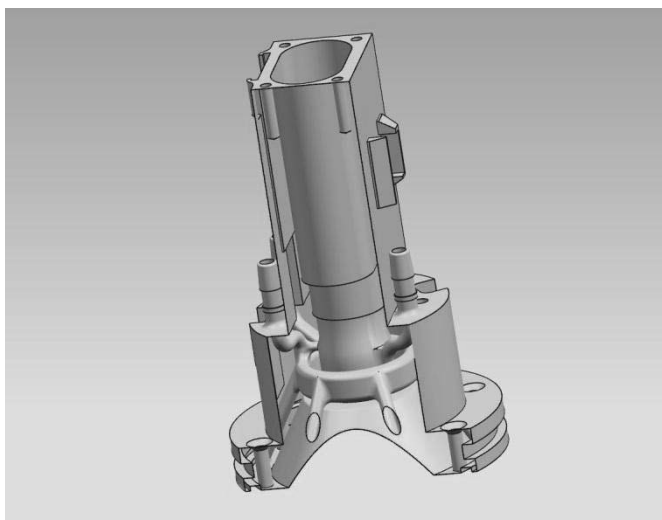


Bild 1: Funktionsintegrierende Konstruktion des Reflektorhalters

---

Als zentrales Element des Stoßwellenkopfes ist der Reflektorhalter für die eindeutige Positionierung des Reflektors als auch der verstellbaren Zündelektroden zuständig. Um eine optimale Entladung zu ermöglichen, ist eine kontinuierliche Regelung des Abstandes zwischen den Zündelektroden notwendig, wobei die Führung der verstellbaren Elektroden ebenfalls durch den Reflektorhalter zu realisieren ist. Wie zuvor erwähnt, sind weitere Funktionen die Zuführung des Wassers sowie die Abführung der Abgase.

All die aufgeführten Funktionen wurden in der ersten Entwicklungsstufe in ein einzelnes Bauteil integriert. Durch die Funktionsintegration konnten so deutliche Einsparungen hinsichtlich Gewicht und Bauraum gegenüber den konventionell gefertigten Bauteilen erreicht werden. In einem weiteren Entwicklungsschritt folgte die Integration eines Drucksensors samt Halterung für dessen Elektronik. Zudem konnte eine Teilintegration des mechanischen Auslösetasters (ebenfalls mit Elektronikhalterung) umgesetzt werden. Es erfolgte weiterhin die Optimierung der Zu- und Abflusskanäle. Zudem wurden Anschlussbeschriftung und Bauteilnummerierung direkt generativ mitgefertigt.

Um eine Gefährdung des Anwenders oder des Patienten durch die Hochvoltanwendung in Kombination mit Wasser ausschließen zu können, wurde während der gesamten Entwicklung der Isolierung und der Dichtung des gesamten Systems besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Die Dichtung wurde zum einen durch den Einsatz von O-Ringen in bereits in das Bauteil integrierten Dichtungsnuten realisiert. Zum anderen wurde durch eine spezielle Imprägnierung des Bauteils die Dichtheit des Materials sichergestellt.



Bild 2: Generativ gefertigter Reflektorhalter (SLS/PA12)



---

Für die wirtschaftliche Produktion einer Serie von 150 Reflektorhaltern pro Jahr, wurde als Produktionsverfahren das selektive Lasersintern (SLS) ausgewählt. Als Werkstoff kam hier aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Standfestigkeit Polyamid (PA12) zum Einsatz (Bild 2).

Die Entwicklungszeit des Reflektorhalters, der die Grundvoraussetzung für einen leichten, kompakten Stoßwellenkopf darstellt, belief sich – von der Idee bis zum Einsatz im Serienprodukt – auf drei Jahre. Dabei wurde sehr eng mit einem, auf generative Verfahren spezialisierten, Produktionsdienstleister zusammengearbeitet, da dieser über das relevante Konstruktionswissen verfügte. Nach dem Serienanlauf waren nochmals zwei Jahre kontinuierliche Entwicklungsarbeit und entsprechende gestalterische Anpassungen am Reflektorhalter notwendig, um das gewünschte Qualitätsniveau und somit den zuverlässigen Einsatz des Systems zu erreichen.

## 7 Zusammenfassung

Dieser Beitrag behandelt die Fragestellung, wie das Potential generativer Fertigungsverfahren durch die Konstruktion, insbesondere bei der Gestaltung von Serienbauteilen, weiter ausgeschöpft werden kann. Ausgehend von den derzeit relevantesten generativen Fertigungstechnologien wurde ein Ansatz entwickelt, der Konstrukteure bei der Identifizierung von Bauteilen unterstützt, die sich für eine Substitution durch generativ gefertigte Bauteile eignen. Dazu wurden zunächst vier allgemeine Potentialcluster definiert, die für den Konstrukteur eine erste Orientierungshilfe bieten. Weiter beinhaltet der Ansatz die Idee durch spezifische Fallbeispiele die konstruktiven Umsetzungen von Bauteilsubstitutionen exemplarisch aufzuzeigen, um so Wissen über die Gestaltungsmöglichkeiten mit generativen Verfahren in einer solchen Form bereitzustellen, dass dieses aufgenommen und für eigene Problemstellungen adaptiert werden kann.

Als eines dieser Fallbeispiele wird in diesem Beitrag die Konstruktion eines generativ gefertigten Reflektorhalters vorgestellt. Die Analyse des Fallbeispiels zeigt, dass im Bereich der Konstruktion mit generativen Fertigungsverfahren noch erheblicher Bedarf besteht, die Erschließung der aufgeführten Potentialcluster methodisch zu unterstützen. Im Fallbeispiel wurde die Entscheidung, das Bauteil generativ zu fertigen, überaus frühzeitig getroffen, da mit konventionellen Fertigungsverfahren die Bauraum- und Gewichtsanforderungen nicht erreicht werden konnten. Diese frühe Festlegung zielte primär auf eine integrierte Gestaltung der Kanäle ab. Erst in weiteren Schritten wurden zusätzliche Potentiale erkannt und schlussendlich auch genutzt, indem weitere Funktionen integriert und so die Herstellkosten in Summe gesenkt wurden.

---

Das Fallbeispiel zeigt somit auf, dass bei der Bauteilsubstitution insbesondere zwei Schlüsselfaktoren einen starken Einfluss auf die Potentialausnutzung aufweisen. Dies ist zum einen die Auswahl der Bauteile, da das Potential stark von deren Anwendung bzw. der geforderten Funktionen abhängt, zum anderen der Zeitpunkt der Entscheidung, ob die Bauteile generativ gefertigt werden. Erfolgt die Entscheidung erst nach der Festlegung des Konzepts, kann durch entsprechende Designregeln [8] zwar eine fertigungsgerechte Konstruktion erfolgen, um das Potential der generativen Fertigungsverfahren jedoch ausschöpfen zu können, sollte die Entscheidung bereits bei der *grundlegenden* Lösungsfindung getroffen sein, so dass die Vorteile generativer Verfahren direkt in die Konzeption und Grobgestaltung einfließen können.

## Literatur

- [1] Emmelmann, C.: Additive Manufacturing von Funktionsbauteilen - Gegenwärtige Herausforderung auf dem Weg zur Serienproduktion, Fachveranstaltung Additive Fertigung, Augsburg, 2012.
- [2] Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing. Hanser, München, 2007.
- [3] Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.: Generative Fertigung mit Kunststoffen. Springer, Berlin, 2013.
- [4] Meindl, M.: Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing, Dissertation, TU München, 2004.
- [5] Reinhardt, T.; Witt, G.: "Ansätze zur Qualitätsbewertung von generativen Fertigungsverfahren durch die Einführung eines Kennzahlensystems", RTejournal, 9(1), 2012.
- [6] Zäh, M.F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Hanser, München, 2006.
- [7] Gruber, G.; Kestel, P.; Staab, A.; Wartzack, S.: "Methodische Unterstützungsansätze für die Entwicklung additiv gefertigter Bauteile", Rapid.Tech 2013, Erfurt, 2013.
- [8] Zimmer, D.; Adam, G.: "DMDR – Direct Manufacturing Design Rules – Erarbeitung von applikationsunabhängigen Konstruktionsregeln", Rapid.Tech 2011, Erfurt, 2011.

## Geometrischer Abgleich von virtuellem Anlagenmodell und realer Anlage

Inga Thiel<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber<sup>2</sup>, Dr. Thomas Bär<sup>1</sup>  
*<sup>1</sup>Produktionsbezogene Produktabsicherung  
Daimler AG*

*<sup>2</sup>Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Universität des Saarlandes*

### 1 Abstract

Für die Planung von Produktionsanlagen werden heute mittels 3D-CAD-Systemen umfangreiche, virtuelle Anlagenmodelle erstellt, die der Konstruktion, Simulation, Inbetriebnahme und Dokumentation dienen. Während Inbetriebnahme und Aufnahme des Betriebs verändern Anpassungen an geänderte Bedingungen vor Ort und ein gewisses „Einleben“ regelmäßig das Aussehen der Anlage. Zwar betrifft dies üblicherweise nur geringfügige Änderungen, jedoch können die Abweichungen im Nachhinein nicht benannt werden, sodass das gesamte Anlagenmodell unsicher ist. Da keine geeigneten technischen Hilfsmittel zur Erkennung von Abweichungen zur Verfügung stehen, können die Änderungen nicht adäquat in die Planungsdaten übernommen werden. Heute müssen fehlerhafte Datenstände in Kauf genommen werden. Die Automobilbranche unterliegt zudem aktuell, ähnlich wie viele andere Branchen, gesteigerten Anforderungen an die Variantenvielfalt der auf einer Anlage gefertigten Produkte und schnelleren Produktzykluszeiten. Daher müssen immer häufiger Anpassungen an Bestandsanlagen vorgenommen werden. Um die Planungen auf einer verlässlichen Datenbasis durchführen zu können, ist derzeit vor jedem Umbau eine aufwändige Begehung erforderlich. Die Kosten hierfür schlägt der Anlagenbauer auf den Angebotspreis auf. Dieser Abgleich ist sehr aufwändig und für den Menschen ermüdend und bietet da-

---

mit gute Voraussetzungen für den Einsatz computerunterstützter Methoden. Vorgestellt wird eine Methode, mit der die CAD-Daten durch eine strukturierte Aufnahme der tatsächlich realisierten Anlage aktualisiert werden können.

## 2 Einleitung

Planungsdaten werden im Laufe des Anlagenbetriebs für unterschiedliche Maßnahmen benötigt. Beispielsweise müssen weitere Produktvarianten auf der gleichen Linie integriert werden, Instandhaltungsmaßnahmen oder Anpassungen der zwischenzeitlich veralteten Anlagentechnik müssen durchgeführt werden, oder die Anlage soll an einen anderen Standort umziehen. Irritationen treten auf, wenn ein veraltetes Anlagenmodell für weitere Arbeiten eingesetzt wird. Eine konsequente Nachverfolgung aller Änderungen mit den derzeit verfügbaren Methoden ist wirtschaftlich nicht darstellbar. Der Aufwand, sämtliche, insbesondere kurzfristige und provisorische Änderungen im Anlagenbetrieb in die CAD-Modelle zurückzuführen, wäre unverhältnismäßig hoch. Bereits während der Inbetriebnahme kann die Dokumentation nur stichprobenartig überprüft werden. Derzeit ist daher eine aufwändige Begehung mit Auslesen und Ausmessen der Abmessungen, Abzählen der Komponenten und Kontrolle der verbauten Typen anhand des Typenschildes erforderlich.

Der Planer ist auf virtuelle Anlagenmodelle angewiesen, um Änderungen an Produkt, Anlagen oder Anlagenteilen vorzubereiten. Produktions- und Kapazitätsanpassungen müssen ebenso handhabbar sein, wie Re-Use von Anlagen und Anlagenteilen. Für eine schnelle, effiziente Inbetriebnahme ist es erforderlich, regelmäßig den aktuellen Stand des Aufbaus mit dem geplanten Anlagenzustand vergleichen zu können, um Abweichungen möglichst schnell erkennen und beheben zu können. Nach Abschluss der Inbetriebnahme muss der endgültige Zustand mit den Planungsdaten abgeglichen werden. Die Instandhaltung benötigt verlässliche Daten für geplante Maßnahmen, mehr noch aber im Falle unvorhersehbarer Störungen. Der Anlagenzustand muss auch nachgewiesen werden, wenn z.B. ein Wartungsvertrag für eine Anlage oder ein Gewerk abgeschlossen werden soll oder Inventur durchgeführt wird. Für alle planbaren Maßnahmen ist eine Methode zum einfachen, schnellen und preiswerten Aktualisieren der Bestandsdokumentation erforderlich. Wünschenswert ist es, jederzeit vollständige Anlagendokumente verfügbar zu haben.

In diesem Paper wird eine Methode vorgestellt, mit der der Abgleich auf Basis von Bildverarbeitungsdaten semiautomatisch erfolgen kann. Fehlerhaft dokumentierte Objekte werden automatisch markiert und können durch den Bediener geändert werden. Die bei der Planung erfassten Eigenschaften blei-

ben erhalten. Ziel ist es, beginnend mit der Überprüfung der Dokumentation im Rahmen der Inbetriebnahme die Richtigkeit der CAD-Daten jederzeit wiederherstellen und nachweisen zu können. Der Abgleich entlastet den Bediener von aufwändigen und ermüdenden Tätigkeiten. Alle späteren Arbeiten an der Anlage werden durch eine verbesserte Anlagendokumentation unterstützt. Die hier vorgestellte Arbeit konzentriert sich auf die notwendigen technischen Voraussetzungen. Ziel ist die Entwicklung eines technischen Hilfsmittels, das allen Beteiligten einen neutralen Nachweis des tatsächlichen Zustands ermöglicht.

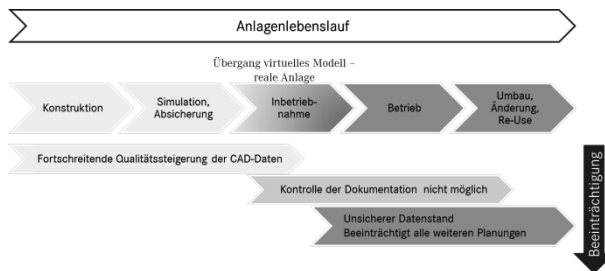


Bild 1: Datenstruktur über den Anlagenbetrieb heute

### 3 Stand der Technik

Der Bedarf zur Überprüfung von CAD-Modellen zeigt sich in diversen Arbeiten, die sich bereits mit diesem Thema beschäftigen haben. Siemens patentierte eine Methode, mit der realisierte Produktionsanlagen mit den korrespondierenden Planungsdaten abgeglichen und Fehler im Aufbau identifiziert werden können [1]. Hierbei werden einzelne Komponenten des CAD-Modells im Vorfeld als Orientierungspunkte festgelegt, von denen bekannt ist, dass sie korrekt erbaut wurden. Anhand dieser Objekte wird das virtuelle Modell an die Bilddaten der realen Anlage ausgerichtet. Dem Bild werden die CAD-Daten der Anlage überlagert. Marker werden nicht benötigt, allerdings ist eine vorherige Definition vertrauenswürdiger Komponenten erforderlich. Weiterhin wurde ein Verfahren zum Ableiten der CAD-Daten von Komponenten durch den Abgleich mit einer Komponentenbibliothek [2] und [10] vorgestellt. Ein virtuelles Anlagenmodell wird aus Komponenten erstellt, die aus einer Bibliothek erkannt werden. Hoffmann beschreibt eine Methode, mit der das CAD-Modell einer realen Fertigungsumgebung aktualisiert werden kann [6]. Neu eingefügte Objekte können vereinfacht eingepflegt und verschobene Objekte korrekt positioniert werden. Hierzu muss ein Objektmodell der zu ändernden Komponente vorhanden sein. Die Position dieser Komponente wird in der realisierten Anlage mit geeigneten Sensoren erfasst und an der erkann-

---

ten Stelle in das gesamte Modell eingefügt. Um die korrekte Errichtung von Gebäuden bereits während der Bauphase beurteilen zu können, entwickelte Daimler Auswerteroutinen zur Vermessung von Fabrikgebäuden [12]. Das zu untersuchende Gebäude wird mit einem Laserscanner eingelesen. Die Punktwolke wird dem CAD-Modell überlagert, wodurch der Bediener in der Lage ist, visuell Soll- und Ist-Zustand des Objektes zu vergleichen [13], [17]. Der Aufwand für Vorbereitung und Durchführung der Messungen ist jedoch recht hoch. Einige Arbeiten beschreiben Methoden zum Wiedererkennen von Objekten aus bestehenden CAD-Dokumenten, um den Konstruktionsaufwand durch Re-Use von Konstruktionselementen zu minimieren, z.B. [8], [18]. Shmukler und Fischer stellen eine Methode vor, mit der CAD-Modelle mit Punktwolken der Produkte abgeglichen werden können [14]. Hierbei werden zunächst über den vorgestellten Algorithmus die beiden Bilder grob abgeglichen und anschließend mittels Iterative-Closest-Point-Algorithmus (ICP) genau überlagert. Die Grobausrichtung ist mit Hilfe eines Deskriptors ohne initiale Annahme der Ausrichtung möglich.

Reverse Engineering ermöglicht den Abgleich von CAD-Modellen mit meist einfachen, beweglichen Bauteilen, wie beispielsweise Karosserie- oder Getriebeelementen. Das Fraunhofer IGD in Darmstadt beschreibt eine Anwendung zum Abgleich von CAD-Daten mit einem physikalischen Modell der Komponenten (PMU, physical mock-up) [15]. Der Abgleich erfolgt visuell durch den Benutzer. Die Firma Metaio entwickelt Methoden zum Einsatz von Augmented Reality im technischen Bereich. Die präzise Überlagerung von CAD-Daten mit einer technischen Einrichtung wurde für unterschiedliche Anwendungen optimiert [9]. Platonov und Langer stellen eine Methode zur Vereinfachung von Wartung und Reparatur vor. Der Realität werden unterstützende Informationen überlagert, wodurch papiergebundene Handbücher ersetzt werden [11]. Schwerpunkt der Arbeit ist die Erstellung eines Konturmodells aus den Bilddaten, mit dem virtuelles Modell und Bild überlagert werden können. Goulette beschreibt ein System, das bei EDF zum Abgleich von technischen Einrichtungen in Nuklearanlagen eingesetzt wird [5]. Hierbei werden aus einem Laserscan einfache Geometrien ausgelesen, z.B. zylindrische und Torus-Formen für Rohrleitungen.

Die Firma GOM bietet als Messgerätehersteller neben diversen Sensoren zur 3D-Messung und optischer Messtechnik auch Software zur Auswertung der Messungen an [4]. Diese beinhaltet beispielsweise die Bearbeitung der aufgenommenen Datenpunktnetze, die Ausrichtung von CAD- und Messdaten, das Erzeugen von Regelgeometrien und Dreiecksnetzen, die Erkennung von Maßabweichungen und die farbliche Darstellung der Differenzen. Die Software PolyWorks der kanadischen Firma InnoMetric Software Inc. bietet Bearbei-

---

tungsmöglichkeiten für 3D-Geometriemessungen wie die Bearbeitung der gemessenen Datennetze, die Extraktion von Kurven und Formlinien, die Ausrichtung an das korrespondierende CAD-Modell oder der Extraktion von Regelgeometrien [3]. Beide Tools sind geeignet, einfache Bauteile mit den korrespondierenden CAD-Daten abzugleichen, komplexe Anlagen sind jedoch nicht vorgesehen.

Insgesamt gibt es eine Vielzahl von Ansätzen, die zwar die Relevanz des Themas verdeutlichen, jedoch nur Einzelaspekte der beschriebenen Problematik beantworten können. Benötigt wird eine schnelle, preiswerte, bedienerfreundliche und damit flächendeckend einsetzbare Lösung zur Aufbereitung der ursprünglichen Konstruktionsdaten komplexer Anlagen in einer Industrieumgebung. Die Anforderungen hierfür werden im Folgenden erläutert.

## 4 Konzept

### 4.1 Anforderungen

Die Erkennung geometrischer Formen und das Ableiten von CAD-Daten ist heute für einfache Geometrien in einer Laborumgebung Stand der Technik. Abweichungen gegenüber einer vorgegebenen Geometrie können hierbei qualitativ erkannt und farblich dargestellt werden. Die Auswertung erfordert jedoch einen Bediener, der die Abweichungen visuell bewertet. Eine Rückführung dieser Informationen in die CAD-Daten ist aufwändig und soll mit der hier vorgestellten Methode auch für komplexe Modelle ermöglicht werden. Die Geometrieerkenntnis wird derzeit durch Beschränkung auf einfache Geometrie oder Komponenten einer Bibliothek erreicht. Der geforderte Abgleich von Produktionsanlagen ist mit den bereits bekannten Methoden nicht möglich. Die hier fokussierten Zwecke stellen weitergehende Anforderungen, insbesondere:

- Industrielle Umgebung, keine Laborbedingungen
- Unterschiedlich große Komponenten (große Flächen ebenso wie Kleinteile)
- Schwer erreichbare Bereiche
- Verdeckungen der Objekte
- Kabel und Schläuche, die derzeit nicht in das CAD-Modell eingetragen werden(→ Störgeometrie)
- Flexible Bauteile und verschiedene Stellungen der Maschinenkomponenten

- Vielfältige Bauteilgeometrie und Materialien (z.B. durchsichtige, glänzende, schwarze Oberflächen)
- Große Datenmengen
- Automatische Erkennung der Abweichungen/ Übereinstimmungen
- Ausgabe vollständiger und korrigierter CAD-Daten
- Schnelle, einfache, preiswerte Lösung, um die Anwenderakzeptanz sicher zu stellen

## 4.2 Grundkonzept

Der Bediener muss die Anlage mit geeigneten Sensoren einscannen. Das Anlagenmodell wird auf einem Visualisierungs- und Interaktionsgerät, beispielsweise einem Tablet-PC dargestellt. Unzulässige Abweichungen vom CAD-Dokument werden hervorgehoben und können bearbeitet werden.

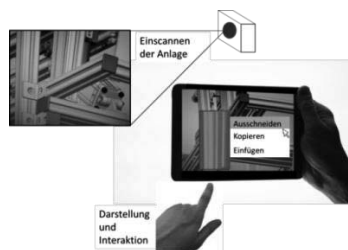


Bild 2: Konzept

Derzeit kann die Anlagenerfassung nur manuell erfolgen. Für den Bediener am komfortabelsten wäre ein Algorithmus, der vollautomatisch alle Abweichungen erkennt und die CAD-Daten entsprechend anpasst. Dies ist aber informationstechnisch sehr aufwändig. Aus der bloßen Geometrie lassen sich auch keine Informationen zu Funktion, Kinematik o.ä. ableiten. Diese Informationen sind im virtuellen Anlagenmodell jedoch bereits vorhanden. Daher sollen die vorhandenen CAD-Daten bestätigt oder korrigiert werden, um die in der Planungsphase erfassten Informationen beizubehalten. Hierzu wird das virtuelle Modell als Vorlage für den Datenabgleich zugrunde gelegt. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die aktuellen Sensorinformationen an einer statischen Vorlage ausgerichtet werden.

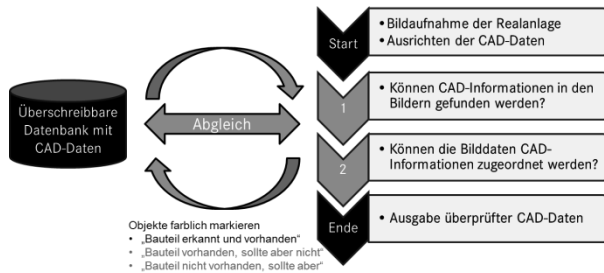


Bild 3: Ablauf des Anlagenabgleichs

Das virtuelle Modell einer Beispielanlage wird mit der entsprechenden realisierten Anlage verglichen. Die Abweichungen zwischen CAD-Modell und eingeleiteter Punktwolke werden mit etablierten Softwarelösungen visuell erkannt und in die CAD-Daten zurückgeführt.

### 4.3 Software und Hardware

Der Bediener kann das CAD-Modell am besten direkt während des Einscannvorgangs korrigieren, wenn er sich eh gerade mit den angezeigten Komponenten beschäftigt. Dies erfordert aber eine bedeutende Rechnerleistung. Alternativ müsste die Nachbereitung der fehlerhaften Dokumentation im Anschluss an den Einscannvorgang erfolgen. Im günstigsten Fall sollte dem Bediener jedoch während des Einscannens zumindest ein eingeschränkter Programmumfang für die wichtigsten Interaktionen zur Verfügung stehen. Die Interaktion erfordert eine Visualisierung des virtuellen Modells. Für die Akzeptanz optimal wäre die Darstellung in Echtzeit. Sollte dies auf Grund von beispielsweise zu geringer Rechnerleistung nicht möglich sein, müssen dem Bediener alternativ nur nach Bedarf kurzfristig die benötigten Informationen angezeigt werden. Für ein flächendeckendes Einscannen ist es wichtig, die Bereiche angezeigt zu bekommen, die noch nicht ausreichend erfasst wurden. Auch müssen die falsch dokumentierten Objekte angezeigt werden, um Änderungen an den CAD-Daten vornehmen zu können. Sowohl für die Visualisierung als auch für die Interaktion ist eine nicht unbedeutende Rechnerleistung erforderlich. Ein leistungsstarker Rechner ist jedoch oft zu groß, schwer und unhandlich für den mobilen Einsatz. Zur Arbeit in der Anlage wäre ein mobiles Endgerät geeignet, wie beispielsweise ein Tablet-PC. Nach derzeitigem Entwicklungsstand ist die Leistungsfähigkeit von Tablet-PCs jedoch unzureichend. Ist die Rechenleistung nicht ausreichend muss ein entsprechend leistungsstarker Rechner eingesetzt werden, evtl. kabelgebunden oder drahtlos mit

---

einem mobilen Interaktionsgerät verbunden. Als Interaktions- und Visualisierungssoftware kommen insbesondere folgende Programme in Betracht:

- CAD-Programme (z.B. CATIA, NX)
- Programme für Reverse Engineering (z.B. PolyWorks, GOM Inspect)
- Bildauswerteprogramme (z.B. MATLAB Image Processing Toolbox, Point Cloud Library, OpenCV)

#### 4.4 Sensoren

Die Anforderungen an geeignete Sensoren sind vielfältig. Die Handhabung sollte möglichst einfach sein und kein explizites Spezialwissen erfordern. Große Anlagen sollten erfassbar sein, jedoch muss die Auflösung ausreichen, um auch kleinere Objekte gut zu erkennen, also ca. im mm-Bereich liegen. Um hinter Verdeckungen sehen zu können muss der Aufbau mobil sein. Die Auswertung der Messdaten sollte möglichst wenig Zeit in Anspruch nehmen. Soweit möglich sollte ausgereifte Technologie zum Einsatz kommen und ein günstiger Preis einen flächendeckenden Einsatz ermöglichen. Wegen vielfältiger Variationen der eingesetzten Komponenten sind unterschiedliche Materialien und Oberflächen zu berücksichtigen. Die zu erfassende physikalische Größe ist die Anlagengeometrie. Denkbar hierfür sind folgende Sensoren:

- Farb- und Tiefenbildkamera (2D- und 3D-Kamera)
- Laserscan
- Infrarot
- Ultraschall
- Radar
- Lidar
- Koordinatenmessmaschine
- Abbildung durch Kernspinresonanz (NMR)
- Röntgentomographie

Farbbildkameras sind weit verbreitet und dementsprechend in vielfältigen Ausführungen lieferbar. Methoden der Bildbearbeitung zur Kanten-, Objekt- und Feature-Erkennung aus 2D-Bildern sind auch in anderen Bereichen (Mul-

---

timediamanwendungen, Überwachungsfunktionen u.a.) etabliert. Hier können unterschiedliche Ansätze übernommen und auf die Anwendung im Produktionsumfeld angepasst werden. Tiefenbilder ermitteln für jeden Bildpunkt den Abstand vom Sensor zum nächstgelegenen Objekt. Sie ermöglichen es daher, auch Schatten und Risse auf einem durchgehenden Objekt zu identifizieren. Laserscanner arbeiten mit einem konzentrierten, modulierten Lichtstrahl. Für Streifenlichtprojektions-Sensoren wird ein sensorspezifisches Lichtmuster ausgesandt. Über Triangulation kann der Abstand zu Objekten vor der Kamera bestimmt werden. Im Consumerbereich setzen sich derzeit preiswerte Sensoren zum Farb- und Tiefensehen durch. Mit KinectFusion wurde ein vielversprechender Algorithmus vorgestellt, der das Modell einer statischen Umgebung aus eingescannten Tiefenbildern einer bewegten Kinect-Kamera erstellt [7]. Informationen aus einer Bilderserie werden zu einem Gesamtbild der Umgebung zusammengesetzt. Dadurch dass die Visualisierung auf der Grafikkarte durchgeführt wird, ist das System echtzeitfähig, was für die Akzeptanz der Darstellung und Interaktionsmöglichkeit des Bedieners erforderlich ist. Mit KinectFusion wird die 3D-Darstellung einer Umgebung mit preiswerter Sensorik verfügbar. Allerdings ist die Größe des eingescannten Modells wegen der Datenmenge auf wenige  $m^3$  begrenzt. Auch versagt der Abgleichmechanismus bei weiten Flächen, da der eingesetzte ICP-Algorithmus keine korrespondierenden Punkte für den Abgleich der Einzelbilder findet. Die Auflösung der Tiefenbilder ist nicht ausreichend um kleine Objekte wie Sicherungen, Schrauben oder Kabel sicher zu identifizieren. Teile dieses Algorithmus können jedoch für die hier gestellte Aufgabe angepasst werden.

IR-Sensoren werden vielfach für thermografische Aufnahmen eingesetzt. Hiermit kann erkannt werden, dass sich ein Objekt vor dem Sensor befindet, nicht aber wo. Ultraschallwellen werden im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen mediengebunden (über Luft) übertragen. Radarsensoren erkennen über die Laufzeiten ausgestrahlter Radarwellen Abstände zu Gegenständen. Lidar-Sensoren basieren auf dem gleichen Prinzip, nutzen aber Laser statt Funk. Die genannten Sensoren werden beispielsweise auch bei der Umfelderkennung im PKW angewendet. Bildgebende Apparate für Kernresonanz und Computertomographie erfordern Spezialwissen und sind relativ teuer. Darüber hinaus sind sie nicht mobil einsetzbar. Koordinatenmessmaschinen sind stationäre Messgeräte, die durch Bauteilkontakt die Geometrie abfahren und auswerten können. Für komplexe Geometrien ist der Messaufwand bedeutend und nur für bedeutende Einzelpunkte sinnvoll einsetzbar.

Nach einer Erstabschätzung erscheinen Farb- und Tiefenbildkameras, Laser-Infrarot-, Ultraschall-, Radar- und Lidarsensoren am aussichtsreichsten. Im ersten Schritt werden Farb- und Tiefenbildsensoren eingesetzt, da diese

---

Sensoren gut verfügbar, preiswert und in vielfältiger Ausführung erhältlich sind. Außerdem sind die Auswerterroutinen durch vielfältige Anwendungen z.B. im Multimediabereich weit verbreitet. Es wird erwartet, dass keiner der beschriebenen Sensoren allein für die vielfältigen Anforderungen an den Geometrieabgleich ausreicht, weshalb die Vorteile unterschiedlicher Sensoren im Sinne einer Multisensordatenfusion kombiniert werden müssen.

#### 4.5 Anwenderkreis

Besondere Vorteile bieten sich voraussichtlich den Planern von Erweiterungs- und Anpassungsumfängen und Instandhaltern in der täglichen Arbeit. Neuanlagenplaner erhalten die Möglichkeit, die bei Inbetriebnahme übergebenen Dokumente zu kontrollieren. Anlagenbetreiber- und –verantwortliche sind für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Dokumente verantwortlich. Mit dem entsprechenden Personenkreis wird das Aufgabenumfeld und die Entwicklungsbereiche abgestimmt: Welche Fehler treten in der Dokumentation vornehmlich auf und welche Konsequenzen hat dies für die praktische Arbeit? Wie kann die Nachdokumentation praxistauglich eingesetzt werden? Welche technischen Hilfsmittel stehen heute zur Verfügung, werden eingesetzt und welche fehlen noch? Die Verantwortlichen müssen durch technische Entwicklungen in die Lage versetzt werden, die Anlagendokumentation während der Inbetriebnahme durchführen und die virtuellen Modelle nach Bedarf abgleichen zu können. Die Anforderungen an Dokumentation und Datenabgleich werden definiert. Anschließend werden die technischen Mittel aufgezeigt, die nach heutigem Stand verfügbar sind und es wird herausgearbeitet, welche Anforderungen durch diese noch nicht beantwortet sind. Hieraus leiten sich die konkreten Entwicklungsziele ab. Sowohl die finanziellen und als auch die nicht monetären Vorteile werden ermittelt und in einem Business Case aufbereitet. Mittels bereits etablierter Software werden Untersuchungen zu einsetzbaren Sensoren, bestehenden Möglichkeiten der Auswertetools und daraus abgeleitet den noch zu entwickelnden Techniken durchgeführt. Übergreifend können durch die Entwicklung und die praktische Anwendung der Methodik allgemeine Vorschläge zur Verbesserung des Planungsprozess und des Anlagenbetriebs abgeleitet werden.

### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Recherchen haben einige Ansätze zur Erkennung einzelner Komponenten in einer definierten Laborumgebung und zum visuellen, nicht automatischen Abgleich von Produktionsanlagen ergeben. Diese werden jedoch der Erfassung komplexer Produktionsanlagen nicht gerecht. Für einen adäquaten Einsatz sind weitere Entwicklungen erforderlich, die in der vorliegenden Arbeit

---

skizziert wurden. Das beschriebene Vorgehen wird den Besonderheiten der Anlagendokumentation gerecht, sorgt für die notwendige Akzeptanz beim Bediener und gleicht die jeweiligen Nachteile unterschiedlicher, für sich vielversprechender Sensoren und Softwaretools aus. Weiterhin werden die Vorteile von automatischen Auswerteroutinen und menschlichem Bediener im Konzept berücksichtigt. Die einfachen, ermüdenden Aufgaben werden durch einen intelligenten Algorithmus durchgeführt, wodurch der Bediener entlastet wird. Das Interesse bei Planern und Instandhaltern an der vorgestellten Methode ist bedeutend. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird das vorgestellte Konzept weiter detailliert und erste Komponenten prototypisch realisiert.

## Literatur

- [1] Appel, M.: „Method for comparison of 3D computer model and as-built situation of an industrial plant“, Patent EP 1 993 072 A1, 2008.
- [2] Bani-Hashemi, A.-R.; Craft, N.; Friedrich, W.; Moritz, S.; Navab, N.; Sauer, F.: „Vorrichtung und Verfahren zur Erstellung eines virtuellen Anlagenmodells“, Patent DE 000019832974 A1, 2000.
- [3] Duwe-3d Homepage, online verfügbar unter: <http://www.duwe-3d.de/>, zuletzt geprüft 13.06.2013.
- [4] GOM – Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH Homepage, online verfügbar unter: <http://www.gom.com/de.html>, zuletzt geprüft 13.06.2013.
- [5] Goulette, F.: „Automatic CAD Modeling of Industrial Pipes from Range Images“, International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, 1997.
- [6] Hoffmann, W.: „Generierung virtueller Welten auf Basis einer realen Umgebung“, Patent DE102005011126 A1, 2005.
- [7] Izadi, S.; Kim, D. et al.: „KinectFusion: Real-time 3D Reconstruction and Interaction Using a Moving Depth Camera“, Santa Barbara 2011.
- [8] Kriegel, H.-P.; Kröger, P.; Mashael, Z.; Pfeifle, M.; Pötke, M.; Seidl, T.: „Effective Similarity Search on Voxelized CAD Objects“, 8<sup>th</sup> International Conference on Database Systems for Advanced Applications, 2003.

- 
- [9] Meier, P.: „Verfahren und System zur Vermischung eines virtuellen Datenmodells mit einem von einer Kamera oder einer Darstellungsvorrichtung generierten Abbild, Patent DE 102007033486 B4, 2010.
- [10] Moritz, S.; Friedrich, W.; Bani-Hashemi, A.-R.; Craft, N.; Navab, N.; Sauer, F.: „Device and Method for Constructing a Virtual Installation Model“, Patent WO 00/02162, 1999.
- [11] Platonov, J.; Langer, M.: „Automatic contour model creation out of polygonal CAD models for markerless Augmented Reality“, 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2007.
- [12] Scheer, F.; Müller, S.: „Indoor Tracking for Large Area Industrial Mixed Reality“, 9th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2010.
- [13] Scheer, F.; Stromberger, F.: „Verfahren und Vorrichtung zum Anzeigen und Verändern einer Darstellung eines mehrdimensionalen Raums und/oder Objekts“, DE DE102010011297 A1, 2010.
- [14] Shmukler, A.; Fischer, A.: „Verification of 3D freeform parts by registration of multiscale shape descriptor“, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010.
- [15] Webel, S.; Becker, M.; Stricker, D.; Wuest, H.: „Identifying differences between CAD and physical mock-ups using AR“, 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2007.
- [16] Wen, Y; Hui, Z.; Yu, Z.; Sun, J.; Paul, J.-C.: „Reconstruction 3D objects from 2D Sectional views of engineering drawings using volume-based method“, Shape Modeling International Conference, 2010.
- [17] Wurdig, T.: „Verfahren zum Vergleich eines realen Gegenstandes mit einem digitalen Modell“, Offenlegungsschrift DE 10 2005 010 225 A1, 2006.
- [18] Zhiying, Y.; Haiqing, C.; Mingxin, Y.: „A new method of CAD drawing management based on content pieces“, International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2011.

# Optimierung von Bauteilen auf Basis von Produktnutzungsinformationen

Bastian Sauthoff, Roland Lachmayer  
*Institut für Produktentwicklung und Gerätebau  
Leibniz Universität Hannover*

## 1 Einleitung

Bei der Entwicklung von Produkten sind derzeit zwei Innovationstrends zu beobachten: Zum einen werden Maschinen mit immer mehr Intelligenz und Sensorik ausgestattet, um deren Einsatzbedingungen zu erfassen und auf Veränderungen selbstständig zu reagieren. Zum anderen sind diese zunehmend miteinander vernetzt und tauschen Informationen untereinander aus. Begriffe wie "Industrie 4.0" und "Internet der Dinge" stehen für diese Innovationstrends [1]. Diesen Entwicklungen ist gemeinsam, dass physikalische Objekte und informationsverarbeitende Systeme miteinander verschmelzen und schließlich eine inhärente Einheit bilden. Solche Systeme werden als „Cyber Physical Systems (CPS)“ bezeichnet [2]. Folgende Charakteristika zeichnen ein CPS aus und verdeutlichen den Unterschied zu anderen intelligenten Systemen wie z.B. Embedded Systems [2,3]:

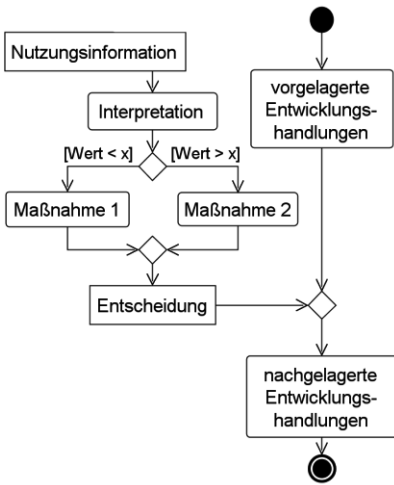
- Jede physikalische Komponente eines CPS enthält integrierte informationsverarbeitende Strukturen sowohl auf Ebene der Hardware als auch der Software.
- Alle Komponenten sind auf mehreren Ebenen miteinander vernetzt und kommunizieren vielschichtig mit anderen Objekten über Systemgrenzen hinweg. Das Agieren der einzelnen Komponenten erfolgt dabei zeitlich und räumlich verteilt.

- 
- Ein CPS reagiert auf Veränderungen durch Adaption der eigenen Konfiguration. Es enthält eine Vielzahl an integrierten Sensoren und Aktoren.
  - Das System verfügt über einen sehr hohen Automatisierungsgrad und ist lernfähig.
  - Ein CPS verfügt über Mechanismen zur Gewährleistung eines zuverlässigen und sicheren Agierens der Komponenten.

## 2 Konzept einer wissensbasierten Gestaltevolution

„Cyber Physical Systems“ eröffnen auch für die Produktentwicklung neue Anwendungsmöglichkeiten. Erfassen Produkte während der Nutzung die äußeren Einflüsse und Wechselwirkungen und senden entwicklungsrelevante Informationen zurück in die Konstruktionsabteilungen, entsteht ein Regelkreis zwischen Nutzungs- und Entwicklungsphase [4]. Die Integration der Nutzungsinformationen in die Prozesse der Produktentwicklung ist wesentliches Merkmal dieses Regelkreises. Eine besondere Herausforderung stellt die Rückführung von Informationen dar, die zu einer Adaption der Produktgestalt führen. Grundlage dafür sind virtuelle Produktmodelle, mit denen das Produkt über Gestaltparameter beschrieben wird. Die Anpassung der Gestaltparameter an Nutzungsinformationen wird hier in zwei verschiedene Prozesse unterteilt: Während bei einer direkten Informationsrückführung ein direkter logischer Zusammenhang zwischen Information und Maßnahme, z.B. der Änderung des Wertes eines bestimmten Gestaltparameters, definiert wird, sind bei einer iterativen Rückführung Information und Handlung nur indirekt über einen iterativen Anpassungsprozess verknüpft (siehe Bild 1). An einem Beispiel für mechanisch belastete Bauteile (siehe Bild 2) wird der Unterschied deutlich: Während für die Dimensionierung von Wellen eine analytisch lösbare Beziehung zwischen dem Gestaltparameter Mindestwellendurchmesser und bei der Nutzung auftretenden Momenten formulierbar ist, liegt bei einem Strukturbauteil, dessen Gestalt über eine Vielzahl an Parametern beschrieben wird, ein mechanisches Feldproblem vor. Die auf Grund einer Belastung resultierenden Spannungen sind für eine Gestaltvariante nur numerisch bestimmbar. Eine optimale Konfiguration der Gestaltparameter ist nur iterativ ermittelbar. Die iterative Informationsrückführung wird dadurch zu einem Optimierungsproblem. Damit liegen zwei Rückführungsmechanismen vor, die je nach Art des Produktes sowie der Nutzungsinformation unterschiedliche Anforderungen an die Integration in rechnergestützte Entwicklungsprozesse stellen. Ein weiterer wichtiger Aspekt dafür ist die Beantwortung der Frage, in welche Entwicklungsphase – es wird hier von nur einer Informationsrückführung

direkte Informationsrückführung



iterative Informationsrückführung

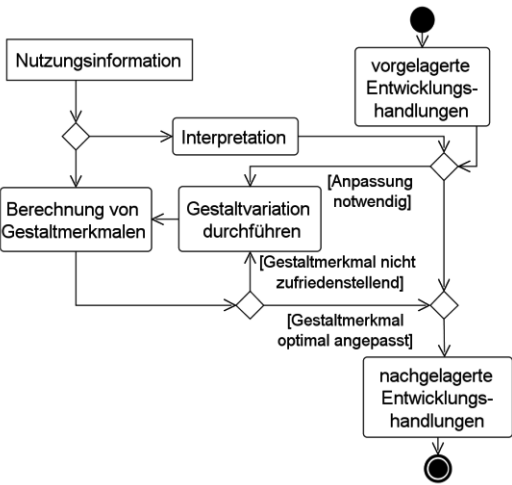
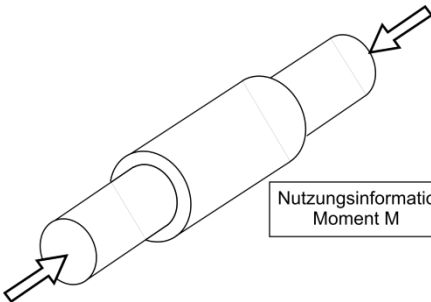
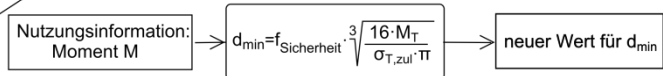


Bild 1: Prozesse der Informationsrückführung



direkte Informationsrückführung



iterative Informationsrückführung

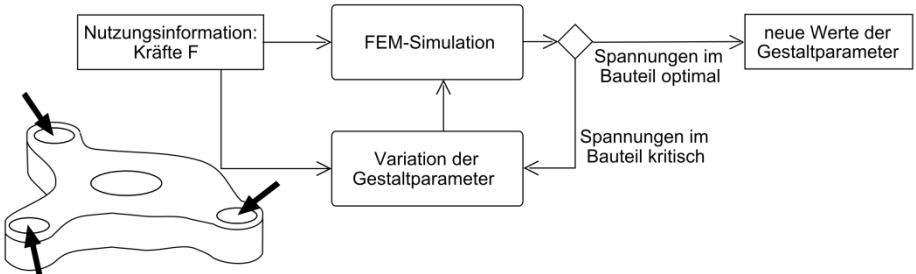


Bild 2: Beispiele einer Informationsrückführung für mechanische Bauteile

---

ausgegangen – diese erfolgt. Wird zugrunde gelegt, dass ein geschlossener Regelkreis zwischen Entwicklungs- und Nutzungsphase angestrebt wird, ergibt sich die Notwendigkeit einer ebenfalls geschlossenen Modellierungskette zwischen der Phase, in die die Rückführung erfolgt und dem Ende des Entwicklungsprozesses. Für die verschiedenen abstrakten virtuellen Produktmodelle der einzelnen Entwicklungsschritte werden dafür eindeutige Schnittstellen benötigt. Daraus folgt, dass eine Informationsrückführung umso schwieriger wird, je früher diese in den Entwicklungsprozess erfolgt. Da eine geschlossene phasenübergreifende Modellierungskette auch mit den heutigen Werkzeugen nur in Ausnahmefällen abbildbar ist, ja selbst für die Phase des Entwerfens eine Herausforderung darstellt, werden hier für eine detailliertere Untersuchung der Informationsrückführung folgende Einschränkungen vorgenommen:

- Die Rückführung wird auf die Entwurfsphase beschränkt, wobei eine geschlossene Modellierungskette in der Phase des Ausarbeitens vorausgesetzt wird.
- Es werden nur mechanische Größen als Nutzungsinformation verwendet.
- Die Rückführung wird auf ein einzelnes Bauteil angewendet und Wechselwirkungen innerhalb der Baugruppe nicht modelliert.

## 2.1 Ansätze adaptiver virtueller Produktmodelle

Den virtuellen Produktmodellen kommt eine zentrale Bedeutung bei der Konzeption eines geschlossenen Regelkreises zu. Deshalb werden im Folgenden bestehende Ansätze zur Automatisierung von (Teil-)Prozessen des Entwerfens untersucht. Folgende Anforderungen an die Beschaffenheit von Produktmodellen zur Informationsrückführung werden zunächst definiert:

- Für die Adaption der Bauteilgestalt müssen Modelle zur Synthese, in der Entwurfsphase sind dies im Wesentlichen CAD-Modelle, nicht den Gestaltentwurf zu einem bestimmten Zeitpunkt abbilden, sondern einen Entwurfsraum, in dem die Gestalt variierbar ist.
- Um Regeln und Richtlinien zur Gestaltung nicht zu verletzen, ist es erforderlich Gestaltungswissen in geeigneter Form in die Modelle zu integrieren und mit der Adaption zu verknüpfen
- Nutzungsinformationen und Gestaltvariationen müssen je nach Rückführungsart mit Analysemodellen gekoppelt werden

---

In der Literatur sind verschiedene Konzepte zur Automatisierung sowohl von Teilen der Entwurfsphase als auch des gesamten Konstruktionsprozesses zu finden. Erste Arbeiten dazu wurden von Bock, Hansen, Bischoff und Müller in den 60er Jahren in der DDR durchgeführt, blieben jedoch theoretischer Natur [5]. In der Bundesrepublik wurden ab den 70er Jahren von Rodenacker, Roth, Franke und Koller, die zur Schule der „strikten“ Methodiker gezählt werden, Arbeiten zur Systematisierung des Konstruktionsprozesses durchgeführt, mit der Hoffnung eine Algorithmisierung und Automatisierung von (Teil-) Prozessen des Konstruierens durchzuführen [5,6]. Parallel entwickelte sich die CAD-Technik zu einem einsetzbaren Werkzeug zur Modellierung von Gestalt. Durch Makroprogrammierung wurden Erfolge bei der Automatisierung von Tätigkeiten des Ausarbeitens erzielt. Eine rechnergestützte Umsetzung der Ansätze für weitere Synthesetätigkeiten in die Praxis gestaltete sich jedoch schwierig. Bei einer genaueren Betrachtung der Ansätze der 70er Jahre, beispielsweise den Katalogsystemen von Roth [7] im Vergleich mit den früheren Arbeiten fällt jedoch auf, dass diese einen deutlichen Schwerpunkt in funktionalen und gestalterischen Aspekten aufweisen. So unterteilt Roth beispielsweise die Gestalt von Bauteilen in eine Struktur- und Konturgestalt auf und liefert z.B. mit Gestaltvariationsoperatoren ein theoretisches Gerüst für die Abbildung von Entwurfsprozessen. In den 1980er Jahren entwickelte sich die CAD-Technik stetig weiter. Mit der Feature-Technologie und der Entwicklung der Parametrik wurden zwei wesentliche Bausteine geschaffen, um auch in der Phase des Entwerfens eine rechnergestützte Modellierung zu unterstützen. Durch logische und algebraische Verknüpfungen erschloss sich eine gemeinsame Abbildung von Produktstruktur und Produktgestalt im CAD. Aus diesen Ansätzen heraus wurden Ende der 80er Jahre die sog. Expertensysteme, heute als wissensbasierte Systeme (Knowledge Based Systems, KBS) bezeichnet entwickelt [8,9]. Diese lassen sich in zwei generelle Arten unterteilen: Wird die Parametrik nicht nur auf die Geometrierstellung angewendet, sondern auch auf funktionale und physikalische Gestaltparameter, ist auch die Struktur eines Produktes sowie dessen Entwurfslogik im Rechner abbildbar. Anhand von Eingangsparametern wird durch produktspezifische logische Verknüpfungen anhand von Bedingungen und Regeln eine entsprechende Lösung „konfiguriert“. Diese lassen sich als „Constraint-Based Systems“ bezeichnen. Dem gegenüber stehen die sog. „Knowledge-Based Engineering Systems(KBES)“. Durch die Verknüpfung mathematischer Optimierungsverfahren mit Feature-Technologie und Parametrik findet die Lösungsfindung nicht nur auf Basis von logischen Bedingungen sondern auch durch iterative Parametervariation durch die Auswertung verknüpfter Analysemodelle, heute üblicherweise auf Basis numerischer Modelle, statt. Dadurch ist in der Phase des Entwerfens eine Abbildung der iterativen Prozesse zwischen Gestaltsynthese und -analyse möglich. Die rechnertechnische Umsetzung solcher Systeme

---

bringt jedoch bis heute erhebliche Herausforderungen mit sich. Für die Konzeption einer Informationsrückführung in der Phase des Entwerfens stehen mit den CBS und den KBES zwei Ansätze zur Verfügung, wobei die CBS nur für eine direkte Rückführung in Frage kommen, wohingegen die KBES auf Grund des iterativen Charakters auch eine iterative Rückführung unterstützen.

Neben den vorgestellten Ansätzen gibt es auf dem Gebiet der Strukturoptimierung zwei weitere Methoden, die die Adaption von Gestalt unterstützen: Die Kontur- und die Topologieoptimierung. Beide Methoden haben gemeinsam, dass die Geometrie eines Bauteils nicht über Gestaltparameter sondern mittels Netzen beschrieben wird. Bei der Konturoptimierung werden auf Basis eines FE-Modells die Knoten der Bauteilkontur solange iterativ verschoben, bis diese bezüglich einer Zielgröße, beispielsweise der Spannungsverteilung, optimal gestaltet ist. Ergebnis ist eine optimale Konturgestalt. Bei der Topologieoptimierung hingegen wird der verfügbare Entwurfsraum mit finiten Elementen modelliert und ebenfalls iterativ Elemente entfernt und hinzugefügt. Ergebnis ist eine Bauteiltopologie, die optimal an die Randbedingungen des zugrunde liegenden Feldproblems angepasst ist. Zwar kann diese mit Glättungsalgorithmen in eine CAD-Geometrie überführt werden, enthält jedoch keinerlei funktionale Elemente, wie beispielsweise Verbindungen (Schrauben, Schweißnähte, etc.). Diese ist deshalb eher als strukturmechanisches Konzept für die weitere Entwurfsphase zu interpretieren. Bei beiden Methoden ist außerdem die Formulierung von Gestaltrandbedingungen nur eingeschränkt möglich, da diese netzbezogen erfolgt [10]. Kontur- und Topologieoptimierung bilden deshalb nur spezielle Teilprozesse des Entwerfens ab, diese jedoch sehr erfolgreich. Nutzungsinformationen lassen sich in beide Methoden über Randbedingungen des zugrunde liegenden Feldproblems integrieren. Sie sind deshalb beide der iterativen Informationsrückführung zuzuordnen. In Tabelle 1 sind alle vier Ansätze mit wesentlichen Merkmalen zusammenfassend dargestellt. Daraus geht hervor, dass für eine iterative Informationsrückführung drei von 4 Ansätzen geeignet sind. Von diesen bieten die KBES den größten Gestaltungsspielraum, sind jedoch auch am schwierigsten zu handhaben. Da für die Rückführung mechanischer Größen in die Entwurfsphase ein direkter Rückführungsprozess nur in Spezialfällen – wie bei der anfangs erläuterten Welle – einsetzbar ist, werden reine Constraint-Based Systems hier nicht weiter betrachtet. Die vorgestellten Methoden der Strukturoptimierung werden ebenfalls in den Hintergrund gestellt, da diese zwar für mechanische Fragestellungen gut geeignet sind, jedoch weder einen geschlossenen Regelkreis noch die Integration ganzheitlicher gestaltender Randbedingungen unterstützen. Um das volle Potenzial einer Informationsrückführung in die Entwurfsphase zu untersuchen, wird hier der KBES-Ansatz weiter verfolgt.

Tabelle 1: Merkmale verschiedener adaptiver virtueller Produktmodelle

	CBS	KBES	Kontur- optimierung	Topologie- optimierung
Synthesemodell	parametrisch	parametrisch	netzbasiert	netzbasiert
Analysemodell	analytisch	analytisch und nume- risch	numerische Feld- probleme	numerische Feld- probleme
Variationsraum	global	global	lokal	global
Variationsebene	Baugruppe /Bauteil	Baugruppe /Bauteil	Bauteil	Bauteil (Baugruppe)
Gestalttrandbe- dingungen	ja	ja	einge- schränkt	einge- schränkt
Rechenaufwand	mittel	hoch	gering	mittel
Implementie- rungsaufwand	mittel	hoch	gering	gering
Ergebnis	Parameter- satz	Parameter- satz	Konturgestalt	Struktur- konzept
Informations- rückführung	direkt	iterativ	iterativ	iterativ

### 3 Gestaltevolution in der Entwurfsphase von Einzelteilen

Die Entwicklung eines Knowledge-Based Engineering Systems ist sowohl stark von den spezifischen funktionalen und gestalterischen Merkmalen eines Produktes abhängig, als auch von den zur Verfügung stehenden rechnergestützten Werkzeugen und deren Funktionen. Zusätzlich bringt die Integration von Nutzungsdaten weitere Anforderungen mit sich. Deshalb wird anhand eines Beispiels, dem Radträger eines Rennfahrzeuges, erläutert, wie für ein bestehendes Bauteil ein Konzept für ein KBES mit integrierter Informationsrückführung entwickelt werden kann.

Der in Bild 3 dargestellte Radträger wird während der Nutzung über Reifen und Felge mit Kräften belastet, die an drei Aufhängungspunkten des Radträgers im Fahrwerk zu Reaktionskräften führen. Diese Kräfte werden über eine Sensorik, die in den Radträger integriert ist, aufgezeichnet und in

den Entwicklungsprozess des Radträgers zurückgeführt. Darauf basierend werden charakteristische Lastfälle für Radträger ermittelt [4].

### 3.1 Invarianz von Nutzungsinformationen

Bei der Konzeption einer Gestaltoptimierung des Radträgers stellt sich die Frage, wie weitreichend eine Gestaltvariation zugelassen wird. Bei der Betrachtung des Radträgers als Bestandteil des Fahrwerks wird ersichtlich, dass die strukturelle Gestalt des Radträgers, konkret die Abmaße der Lager- und Aufhängungspunkte, nicht verändert werden darf. Grund dafür ist, dass dadurch eine funktionale Änderung des Fahrwerks erfolgen würde, was wiederum zu veränderten Reaktionskräften führt. Daraus wird abgeleitet, dass die Reaktionskräfte des Radträgers nur inhärente Merkmale desselben sind, wenn die Struktur des Radträgers in der übergeordneten Baugruppe erhalten bleibt. Bezüglich der Konzeption von Gestaltvariationen sind für bestimmte Nutzungsinformationen also nur diejenigen Variationen zulässig, die gegenüber diesen invariant sind. Weiterhin ist auch bei der Überlegung, welche mechanischen Größen als Nutzungsinformation verwendet werden, auf eine Invarianz dieser gegenüber der Gestalt zu achten. Werden beispielsweise die Spannungen an bestimmten Stellen gemessen, kann auf Basis dieser keine Gestaltoptimierung erfolgen, da jegliche Gestaltvariation zu einer Änderung der Spannungsverteilung führt.

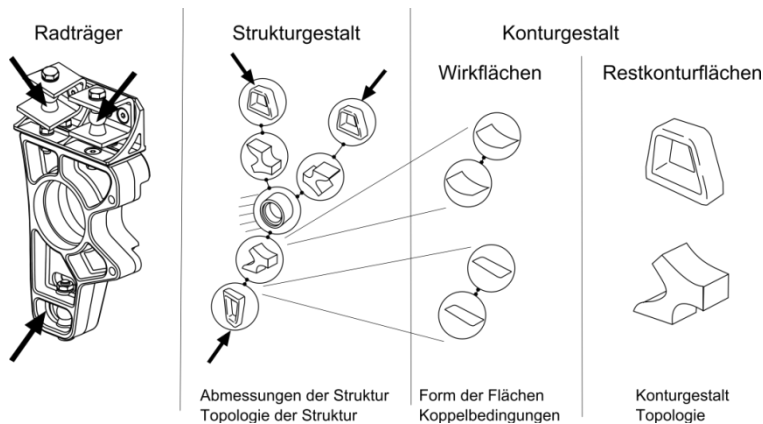


Bild 3: Modellierungskonzept am Beispiel Radträger



---

## 3.2 Gestaltvariationskonzept

Die Beschreibung der Bauteilgestalt erfolgt in KBES über parametrische Modelle, aus denen ein Analysemodell abgeleitet wird. Mittels Optimierungsalgorithmen, beispielsweise genetischen Algorithmen, wird die Gestalt dadurch verändert, dass die Werte des Parametersatzes variiert werden. Selbst bei einem Einzelteil nimmt die Parameteranzahl beträchtlichen Umfang an. Dies führt insbesondere bei Modellen, deren Entwurfsraum globale Eigenschaften hat, dazu, dass die zulässigen Wertebereiche einzelner Parameter wiederum von den Werten anderer Parameter abhängig sind. Der Aufbau eines stabilen parametrischen Modells wird dadurch zu einer Herausforderung. Deshalb wird hier die Konzeption eines modularen Synthesemodells vorgeschlagen (Bild 3). Dabei wird ein Bauteil nach dem Ansatz von Roth [7] in Struktur- und Konturgestalt aufgeteilt. Weiterhin wird die Gestalt hinsichtlich inhärenter Gestaltmerkmale analysiert und es werden sog. Gestaltelemente definiert, die je einen Teil der Bauteilgestalt abbilden. Für den Radträger werden bei einer einfachen Betrachtung drei wesentliche Gestaltelemente identifiziert: Die Lageraufnahme, ein Verbindungselement und ein Aufhängungselement. Mittels der Strukturgestalt und der Gestaltelemente wird der Radträger komplett beschrieben. Die Parametrierung erfolgt auf Ebene der Gestaltelemente, wobei diese wesentliche Eigenschaften der Strukturgestalt erben. Für die Kopplung der einzelnen Elemente wird zusätzlich eine Aufteilung in Wirkflächen und Restkonturgestalt vorgenommen. Die Merkmale der Wirkflächen sind ebenfalls auf Ebene der Strukturgestalt festgelegt. Durch dieses Konzept wird die Parametrierung lokalisiert, sodass weniger Abhängigkeiten auftreten. Zusätzlich eröffnet die Definition verschiedenartiger Gestaltelemente gleichen Typs die Möglichkeit, durch Austausch einzelner Elemente Gestaltvariationen abzubilden, die über eine Parametrierung der Geometrie nicht abbildbar sind. Für den Radträger werden so beispielsweise verschiedene Rippenkonzepte für ein Verbindungselement hinterlegt.

Zur Entwicklung eines spezifischen Konzeptes für ein KBES mit integrierter Informationsrückführung sind demnach folgende Punkte zu betrachten:

1. Identifikation von gestaltinvarianten Nutzungsinformationen
2. Definition des zulässigen Gestalt-Variationsraumes
3. Analyse der Bauteilgestalt und Identifikation von Strukturgestalt und Gestaltelementen
4. Parametrierung der Strukturgestalt sowie der Wirkflächen

5. Definition der Typen eines jeden Gestaltelementes sowie deren Parametrierung

#### 4 Konzeption und Implementierung einer Entwicklungsumgebung

Für die Implementierung des Konzeptes für den Radträger ist neben dem Gestaltmodell die Einbindung eines Optimierungsalgorithmus und eines FE-Modells erforderlich. Diesbezüglich werden drei Rechnerwerkzeuge hinsichtlich ihrer Eignung verglichen (Tabelle 2). Auf Grund der problemspezifischen Fragestellungen, die bei einer Informationsrückführung entstehen, ist eine umfangreiche Programmierschnittstelle zur Einbindung externer Programme und Routinen wichtigstes Auswahlkriterium. Weiterhin ist die Unterstützung von KBE-Funktionalitäten von Bedeutung, um den Programmieraufwand gering zu halten. Autodesk stellt mit Inventor diese wesentlichen Funktionen zur Verfügung. Die Implementierung eines genetischen Algorithmus zur Adaption der Parametersätze erfolgt in Python, während zur FE-Analyse die Umgebung Abaqus eingebunden ist. Das in Bild 4 dargestellte Komponentendiagramm erläutert die Architektur der Entwicklungsumgebung.

Tabelle 2: Vergleich von Rechnerwerkzeugen

	AbaqusCAE (DS)	Inventor (Autodesk)	Creo (PTC)
Application Programming Interface (API)	Python	Visual Basic, Python	C++ (eingeschränkt)
Optimierungsalgorithmus	AbaqusATOM	nein	BMX
Parametrierung	eingeschränkt	voll unterstützt	voll unterstützt
Konstruktionsregeln	nein	iLogic, imate	eingeschränkt
Produktstruktur	nein	voll unterstützt	voll unterstützt
FE-Modul	integriert	angeschlossen	angeschlossen

#### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand des Beispiels Radträger ist ersichtlich, welche Aspekte bei einer iterativen Informationsrückführung in die Entwurfsphase von Einzelteilen zu berücksichtigen sind. Das vorgestellte Gestaltvariationskonzept verdeutlicht, dass eine methodische Vorgehensweise unumgänglich ist, um den Herausforderungen einer rechnergestützten Realisierung gerecht zu werden.



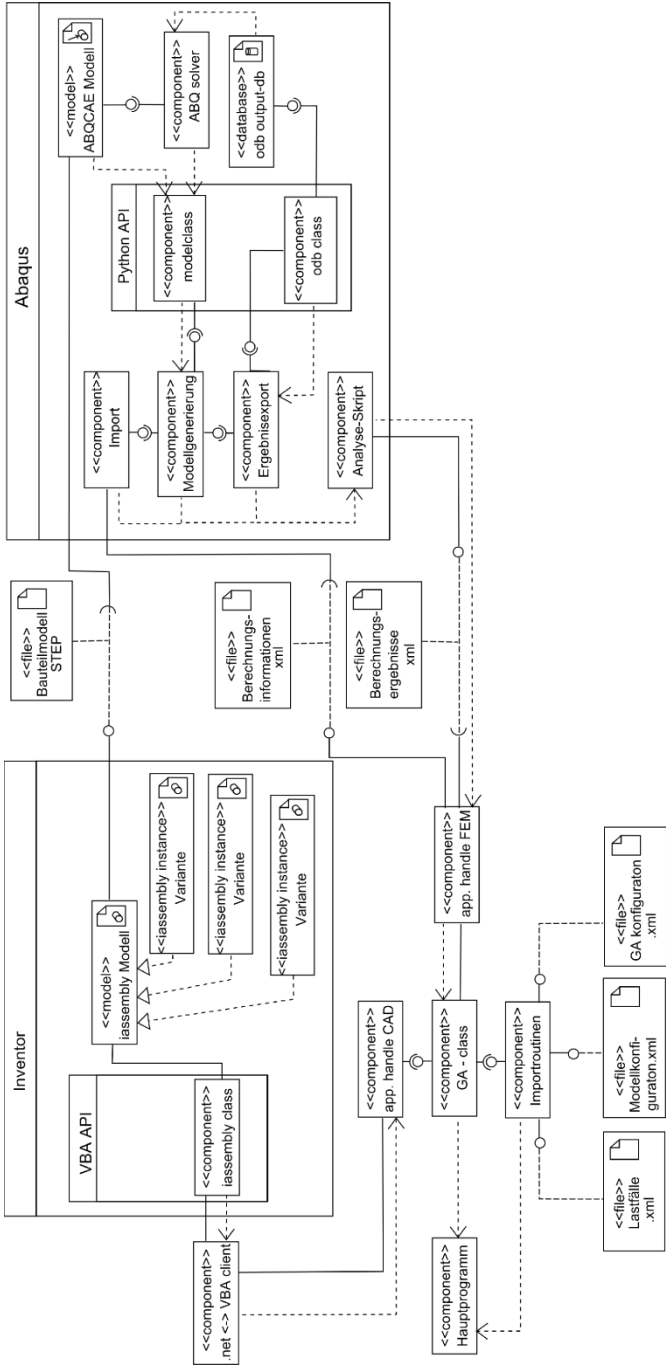


Bild 4: Komponentendiagramm der Entwicklungsumgebung

---

In der Zukunft ist die Rückführung mehrerer Nutzungsinformationen zu untersuchen und das Gestaltvariationskonzept auf Baugruppen zu erweitern.

## Literatur

- [1] Scheer, A.W.: "Industrie 4.0. Wie Big Data uns und unser Leben vorhersagbar macht", ISBN 9783981583328, 2013.
- [2] Sanislav, Teodora; Miclea, Liviu: "Cyber-Physical Systems - Concept, Challenges and Research Areas", in: Control Engineering and Applied Informatics, Band 14, Nr.2, 2012, S. 28-33
- [3] Shi, Jianhua; Wan, Jiafu; Yan, Hehua; Suo, Hui: "A Survey of Cyber-Physical Systems", International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2011, ISBN 978-1-4577-1009-4
- [4] Lachmayer, R.; Mozgova, I.; Sauthoff, B.; Gottwald, P.: "Product Evolution and Optimization based on Gentelligent Components and Product Life Cycle Data", In Proceedings of CIRP Design 2013, Bochum, 2013, S. 685-694
- [5] Heymann, Matthias: „Kunst und Wissenschaft in der Technik des 20. Jahrhunderts: Zur Geschichte der Konstruktionswissenschaft. Habilitation TU Berlin, Chronos-Verlag, Zürich, 2004,
- [6] Franke, Hans-Joachim: Untersuchungen zur Algorithmisierbarkeit des Konstruktionsprozesses, Diss., 1976, Braunschweig, VDI-Verlag
- [7] Roth, Karlheinz: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, 3.Auflage, Springer-Verlag, 2001
- [8] Figel, Klaus: Optimieren beim Kostruieren: Einsatz von Optimierungsverfahren, CAD und Expertensystemen, Carl Hanser Verlag, 1998
- [9] La Rocca, Gianfranco: "Knowledge based engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design", Advanced Engineering Informatics 26, 2012, S. 159-179.
- [10] Harzheim, L.: "Strukturoptimierung, Grundlagen und Anwendungen", Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt a.M., 2008

## **Ansatz zur CAD-integrierten Rückführung von Konstruktionsgeometrie aus Formoptimierungsergebnissen**

Thomas Stangl, Sandro Wartzack  
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
FAU Erlangen-Nürnberg*

Today, the short product lifecycle is a main challenge to the product developer. This requires a high level of product maturity even in the virtual design stage. The consequence is a reduced time-to-market. Hence, the application of non-parametric shape optimization, especially the low setup-costs, robustness and high flexibility, is successfully established as a common standard. The common method for redesign of the adapted shape (triangulated surface data) in productive use is redesign by means of a CAD-system and visual interpretation. This procedure is susceptible to errors. Consequently, an efficient procedure is still lacking for seamless redesign of shape optimization results in a CAD System. This paper focuses on the development of a solution by presenting an approach and the basic structure of the associated design assistance system. By means of this application, it is possible for the product developer to integrate the complex shape changes of the optimization process in the original CAD model – even without any reverse engineering knowledge. The feature structure of the original model remains intact – and thus the intention and the knowledge of the product developer.

### **1 Einleitung und Motivation**

Produktentwickler stehen heute der Herausforderung gegenüber, ständig steigende Anforderungen hinsichtlich Ressourcen- und Energieeffizienz zu erfüllen. Sie müssen Produkte bereits im virtuellen Entwurfsstadium zu einer

---

hohen Produktreife führen und dabei hinsichtlich der Kundenanforderungen optimieren. Der frühzeitige Einsatz moderner CAD- und Berechnungswerkzeuge ist daher ein essentieller Bestandteil der Produktentwicklung. Vor allem Strukturoptimierungsmethoden stellen dabei hocheffiziente Werkzeuge für den konstruktiven Leichtbau und die Verbesserung der Bauteileigenschaften dar. Das hohe Potential dieser Methoden im industriellen Einsatz wird dabei unter anderem in [1] verdeutlicht. Dabei konnte durch Einsatz der Strukturoptimierung eine Gewichtsreduzierung von über 30% bei Serienkomponenten eines Fahrzeugs und damit ein hohes CO<sub>2</sub> Einsparpotential ermöglicht werden.

Zur Eigenschaftsverbesserung bestehender Bauteile und der Vermeidung von Iterationen zwischen Konstruktion und Berechnung wird vor allem die Formoptimierung eingesetzt. Diese hat das Ziel, durch Gestaltänderungen ein Optimierungsproblem, wie z. B. Minimierung der Spannung, bestmöglich zu lösen [2]. Gerade die Entwürfe hoch belasteter Bauteile, wie z. B. den eines modernen Aluminiumkolbens, können dadurch schnell und kostengünstig verbessert werden. Bei einem der führenden Kolbenhersteller, der Federal-Mogul GmbH, wurde deshalb bereits in einigen Projekten die Gestaltoptimierung mit der Software TOSCA.Shape eingesetzt um Detailbereiche zu verbessern. Aufgrund des aktuell noch problematischen Rücktransfers der Optimierungsergebnisse in die Konstruktion und der fehlenden Funktionalität der sensitivitätsbasierten Optimierung konnte jedoch noch kein Standardprozess etabliert werden.

Um die Anwendbarkeit dieser Werkzeuge in der Produktentwicklung zu verbessern, wird im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts ShapeOpt2CAD „die Entwicklung und Integration einer fertigungs- und belastungsgerechten Formoptimierung in modernen Produktentwicklungsumgebungen“ vorangetrieben. Dabei sollen die im Rahmen dieses Beitrags entwickelten Methoden und Werkzeuge dem Produktentwickler ermöglichen, die Gestaltanpassung aus der Formoptimierung direkt im CAD-System als Konstruktionsgeometrie einzubringen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Einsatz der Formoptimierung im Fokus der Produktentwicklung

Die Gestalt eines Produkts wird durch den Konstrukteur bereits in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses festgelegt [3]. Schwachstellen der Konstruktion werden im industriellen Umfeld aber zunehmend erst nachgelagert, in den spezialisierten Berechnungsabteilungen identifiziert. Dies

---

erfordert häufig mehrfache Iterationen zwischen Konstruktion und Berechnung, wie auch die bisherige konventionelle Kolbenentwicklung zeigt. Hierbei wird auf Basis der Anforderungen des Lastenhefts eines Kolbenprojekts eine erste (Anpassungs-) Konstruktion erstellt, welche anschließend über eine Finite-Elemente-Analyse hinsichtlich der Spannungen und der Betriebsfestigkeit bewertet wird. Bei Nicht-Erfüllung der Auslegungskriterien wird eine Änderung vorgenommen und eine weitere Berechnung durchgeführt – so lange bis alle Auslegungskriterien erfüllt sind.

Um diese Anpassungsschleife zu vereinfachen, wird die Bauteilform heute vermehrt durch parametrische feature-basierte CAD-Modelle aufgebaut, welche eine einfache Anpassung ermöglichen. Diese Modelle können somit in einem parameterbasierten Simulations- und Anpassungsprozess verbessert werden. Man spricht im Deutschen auch von parametrischer bzw. CAD-basierter Formoptimierung [4]. Dies setzt voraus, dass das CAD-Modell höchst flexibel aufgebaut ist. Konkret bedeutet dies, dass die einzelnen geometrisch entscheidenden Kenngrößen individuell veränderbar sein müssen, um eine belastungsgerechte Konstruktion zu erzielen. Diesem Vorgehen ist allerdings in zahlreichen industriellen Anwendungen mit hoher geometrischer Komplexität, wie auch bei modernen Kolben, aufgrund von Abhängigkeiten Grenzen gesetzt. Nach [2] erfordert die Definition einer guten, ausreichend flexiblen Parametrisierung zudem Kenntnis über die optimale Geometrie. Als alternative Vorgehensweise bietet sich die parameterfreie, auch FEM-basierte Form- bzw. Gestaltoptimierung (eng. *shape optimization*) an. Diese bietet drei Hauptvorteile gegenüber der bereits beschriebenen parametrischen Formoptimierung:

- Durch die Parametrisierung der Bauteilgestalt über die Knoten des FEM-Netzes sind nahezu beliebige geformte Gestaltänderungen möglich, d. h. die Knotenkoordinaten selbst stellen die Designvariablen dar.
- Eine aufwendige CAD-Parametrisierung bzw. eine iterative Verbesserung dieser entfällt dadurch komplett.
- Die Verwendung vorhandener FE-Modelle verringert den Setup-Aufwand erheblich – eine Neuvernetzung nach jedem Optimierungszyklus ist ebenso wenig erforderlich.

Dabei finden üblicherweise – bei gleichbleibender Topologie – nur geringfügige Änderungen an der Gestalt statt [2]. Dieser Beitrag beschränkt sich auf einen Ansatz zur Rückführung dieser Gestaltänderungen als Konstruktionsgeometrie, weshalb auf das Optimierungsverfahren selbst nicht näher einge-

gangen wird. Der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich der FEM-basierten Gestaltoptimierung ist in [4], [5], [6] beleuchtet.

## 2.2 Rückführung von Formoptimierungsergebnissen

Allen erwähnten Vorteilen der FEM-basierten Gestaltoptimierung gegenüber steht die aktuell noch problematische Rückführung der Optimierungsergebnisse. Die resultierende Gestalt einer Formoptimierung bei dreidimensionalen Problemen sind dabei mehrfach gekrümmte Oberflächen. In Bild1 sind typische Ergebnisse am Beispiel der Unterseite eines Viertel-Kolben-Modells dargestellt. Optimierungsziel war die Erhöhung der Betriebsfestigkeit.

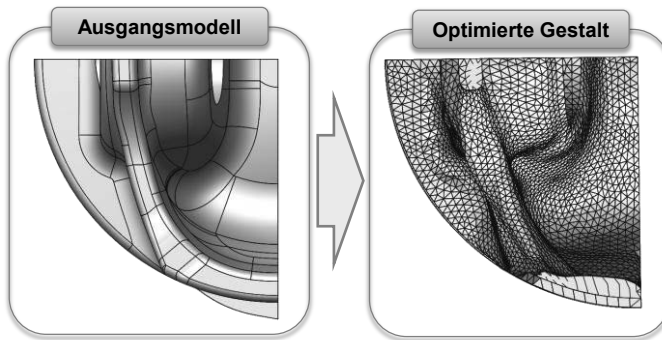


Bild 1: Formoptimierung eines Kolbens

Die Übernahme der Formoptimierungsergebnisse erfolgt typischerweise aus triangulierten Oberflächen (STL- oder IGES-Dateiformat – Bild1, optimierte Gestalt), welche über die Optimierungssoftware zur Verfügung gestellt werden. Diese werden heute im produktiven Einsatz nahezu ausschließlich manuell im CAD-System rekonstruiert. Diese Vorgehensweise ist, gerade bei mehrfach gekrümmten Oberflächen, geprägt von Fehlern und darüber hinaus stark vom Erfahrungsschatz des ausführenden Produktentwicklers abhängig. Demnach ergibt sich eine personenabhängige Interpretation des Optimierungsergebnisses. Diese „ungenaue“ Interpretation hat somit häufig signifikante Einbußen in der Strukturperformance zur Folge [7]. Dies erfordert wiederum mehrfache Iterationen zwischen Konstruktion und Berechnung und führt nicht selten zu geringer Akzeptanz für den Einsatz dieses Verfahrens.

Eine Alternative stellt die Verwendung vorhandener Reverse-Engineering-Methoden und Softwarelösungen aus dem 3D-Scan-Bereich, wie z. B. Geomagic [8], dar. Diese ermöglichen dem Produktentwickler eine automati-



---

sierte Erstellung von NURBS-Flächenmodellen (eng., *Non-Uniform Rational B-Spline*) aus triangulierten Netzen oder Punktwolken mit hoher Genauigkeit [9]. Die so rückgeführten Modelle stellen lediglich Teilflächen ohne zusätzliche Semantik und Topologie dar, wodurch sich wiederum die feature-basierte parametrische Darstellung auszeichnet [9]. Sie sind deshalb für spätere Gestaltänderungen und damit für den Einsatz im Rahmen einer durchgängigen virtuellen Prozesskette ungeeignet. Des Weiteren haben die so erzeugten Flächenmodelle im Fall der Formoptimierung keinen Bezug zum ursprünglichen parametrischen feature-basierten CAD-Modell. Damit ginge die bisherige Konstruktionsabsicht durch die Weiterverwendung rekonstruierter NURBS-Modelle in der Prozesskette verloren. Ein Informationsverlust wäre die Folge. Obwohl die Erzeugung von Flächenmodellen automatisiert wurde, kann und wird die Erstellung von parametrischen Volumenmodellen nach [9] nicht vollständig automatisiert werden. Der Grund hierfür ist, dass die Konstruktionsabsicht aus den Datenpunkten nicht wiederhergestellt und in einem parametrischen Volumenmodell umgesetzt werden kann [9]. Dennoch stellen Softwarewerkzeuge wie Geomagic eine teilautomatische geometrische Feature-Erkennung zur Rekonstruktion von Volumenmodellen zur Verfügung. Diese beschränkt sich auf die Erkennung von Regelgeometrie bzw. Basis-Features, wie Extrudieren, Rotieren, Ziehen etc. [9]. Damit ist sie nicht für die Rekonstruktion unregelmäßig geformter Formoptimierungsergebnisse geeignet.

### 3 Problemstellung

Aus den dargestellten Gründen finden Reverse-Engineering-Werkzeuge aus dem 3D-Scan-Bereich bei der Rückführung von Konstruktionsgeometrie aus Formoptimierungsergebnissen nur selten Anwendung. Neben der zeitintensiven Einarbeitung, sind die unregelmäßig geformten Freiformflächen lediglich wieder Flächenmodelle, die manuell in das ursprüngliche feature-basierte Modell des CAD-Systems integriert werden müssen. Somit fehlt weiterhin eine effiziente CAD-integrierte Methode zur nahtlosen und „konstruktorsgerechten“ Rückführung der Gestaltänderung aus der Optimierung in ein CAD-System. Für eine erfolgreiche und breite Einführung der Gestaltoptimierung ist es erforderlich, dass die Anwender in ihrer gewohnten und bewährten Software-Umgebung arbeiten. Auch die vor- und nachgelagerten Prozesse sind fest im Unternehmen verankert, sodass kein Raum für „Experimente“ oder für hohen Einarbeitungsaufwand neben dem Tagesgeschäft bleibt. Spezialanwendungen wie die Gestaltoptimierung müssen sich deshalb in die vorhandenen Prozesse, mit ihren CAX-Systemen eingliedern. Aus diesen Gründen ist eine Integration von Reverse-Engineering-Ansätzen, angepasst

---

an die Formoptimierung und die Überführung der Gestaltänderung in das ursprüngliche feature-basierte CAD-Modell, erforderlich.

#### 4 Featureform zur Abbildung der Gestaltänderungen

Grundlage des neuartigen Verfahrens ist die Erkennung und Überführung der beliebig geformten Geometrie aus den Ergebnissen der Gestaltoptimierung in eine feature-basierte Form. Dadurch bleiben sowohl die Konstruktionsabsicht als auch die CAD-Features des ursprünglichen Modells erhalten. Unter dem Begriff Feature ist dabei ein abgeschlossener Gestaltkomplex zu verstehen, welcher neben rein geometrischen Basisinformationen sowohl eine topologische Gestalt, als auch häufig eine semantische Bedeutung aufweist [10], [11].

Im Folgenden wird ein Überblick über gängige Feature-Formen gegeben und diese kurz hinsichtlich ihres Einsatzzwecks dargestellt. In heutigen parametrischen CAD-Systemen, wie z. B. PTC Creo, sind so genannte Machining-Features am weitesten verbreitet. Diese bilden Fertigungsoperationen, wie z. B. Bohrungen, Fasen etc. über einfache geometrische Elemente ab [12]. Als weitere Feature-Klassen sind der Literatur Form-Features, Konstruktions-Features, Montage-Features sowie Berechnungs-Features zu entnehmen [13]. Letztere stellen Bausteine dar, die lediglich eine abschnittsweise Abbildung eines FEM-Netzes ermöglichen und damit nicht weiter relevant für das hier dargestellte Verfahren sind. Konstruktions- und Montage-Features zeigen, aufgrund der einfachen Form, eine ähnlich geringe Abbildungsflexibilität wie die dominierend eingesetzten Machining-Features. Form-Features hingegen werden ausschließlich als geometrische Informationsbausteine eingesetzt. So lässt sich die Ausprägung von Features über eine endliche Anzahl von Stellgrößen abändern, was effizient über die Parametrik von CAD-Systemen realisiert wird. Form-Features besitzen eine höhere geometrische Flexibilität als Machining-Features, jedoch auch eine höhere Komplexität was die Stellgrößen anbelangt. Prinzipiell ist bei der Abbildung der optimierten Bereiche einer Struktur der parallele Einsatz der Feature-Formen möglich. In Abhängigkeit der Form der wiederzugebenden Geometrie sind wahlweise Machining-Features, aufgrund ihres einfachen Aufbaus, bzw. Form-Features, aufgrund ihrer geometrischen Flexibilität, vorzuziehen. Bei der FEM-basierten Formoptimierung treten jedoch typischerweise mehrfach gekrümmte Flächen in den Änderungsbereichen des Ergebnisnetzes auf. Dies wurde bereits an den Optimierungsergebnissen eines Kolbens in Bild dargestellt und ist der Flexibilität des Optimierungsverfahrens geschuldet. Versuche am Kolbenmodell haben gezeigt, dass eine derartige Flächenkontur lediglich über die Kombination mehrerer Form-Features aber nur ungenügend über Machining-Features ab-

gebildet werden kann. Aus diesem Grund stützen sich der hier vorgestellte Rückführungsansatz und die Ausführungen dieses Beitrags auf Form-Features. Der Einsatz von Machining-Features kann allerdings weiterhin für die Nachbearbeitung erfolgen.

Ziel des entwickelten Rückführungsansatzes ist es deshalb, die Gesamtkonstruktionsaufgabe derart in Form-Features und deren Basiselemente zu zerlegen, dass jeder dieser Bausteine mit der für die Gestaltanpassung notwendigen Flexibilität versehen werden kann. Gleichzeitig soll das resultierende Modell mit einer vom Konstrukteur beherrschbaren Komplexität steuerbar bleiben.

## 5 Ansatz zur Rückführung der Formoptimierungsergebnisse

Zur Lösung der dargestellten Problemstellung werden ein neuartiger Rückführungsansatz und ein CAD-integriertes Konstruktionsassistenzsystem vorgestellt. Der Produktentwickler ist dadurch in der Lage, auch ohne tiefes Erfahrungswissen, die Gestaltänderungen der Formoptimierung im ursprünglichen CAD-Modell abzubilden. Die ursprüngliche Struktur des Modells und damit die Absicht des Konstrukteurs bleiben dabei erhalten. Bild 22 stellt den groben Ablauf des Ansatzes dar.

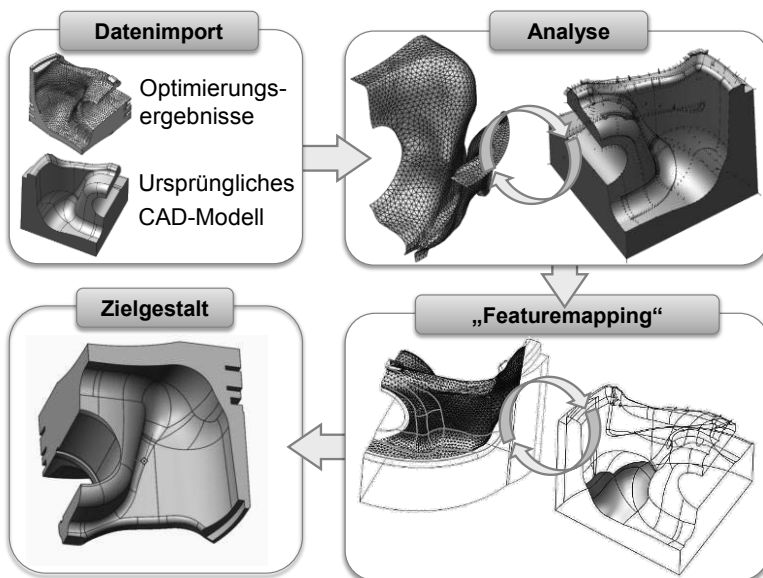


Bild 2: Ablauf des Rückführungsansatzes am Beispiel eines Kolbens

Der automatische Datenimport des Assistenzsystems wertet zunächst die Optimierungsdaten des Formoptimierungssolvers aus, filtert diese und überführt die triangulierten Oberflächen für die weitere Verarbeitung in Polygonnetz-Datenstrukturen innerhalb des Produktmodells. Da die Optimierungsdaten neben den für die Rückführung relevanten Bereichen auch unveränderte Bereiche beinhalten, werden die Änderungsbereiche des Gesamtmodells automatisch identifiziert. Ergebnis dieses Schrittes sind die als Polygonnetz beschriebenen Flächen, wie z. B. unterhalb des Kolbenbodens die bei der Formoptimierung geändert wurden (Bild1, optimierte Gestalt). Zur Erzeugung der erforderlichen Grundelemente für die Abbildung des Änderungs-Features werden im Analyseteil alle erforderlichen geometrischen Basisinformationen aus dem neuen Produktmodell extrahiert. Dazu gehören Berandungssplines, Schnittverläufe etc., also die Elemente, welche die Randbedingungen für eine parametrisierte CAD-Beschreibung darstellen. Über ein Mapping-Verfahren werden die Basiselemente in eine Feature-Repräsentation überführt und auf die angepasste Geometrie abgebildet. Als letzter Schritt wird die Konstruktionsgeometrie direkt als Änderungsfeature in das ursprüngliche CAD-Modell eingebaut. Dadurch bleibt die vollständige Historie erhalten.

Der genaue Ablauf der entwickelten Methoden und Werkzeuge werden nachfolgend im Detail exemplarisch an einem hochbelasteten Aluminiumkolben der Federal-Mogul Nürnberg GmbH dargestellt. Dieser ist aufgrund seiner komplexen Geometrie sehr gut geeignet, um die Anwendbarkeit des Ansatzes zusammenfassend darzustellen.

## 6 Rückführungsprozess am Beispiel eines Kolbens im Detail

Nach erfolgreichem Datenimport ist es zur Erzeugung der neuen Form-Features zunächst notwendig, flexible Elemente zu erzeugen. Versuche in Creo haben gezeigt, dass das Berandungsverbund-Feature (Bild 3) sehr gut geeignet ist, um nahezu beliebige Formen, als Spline-Flächenverbund, abzubilden.

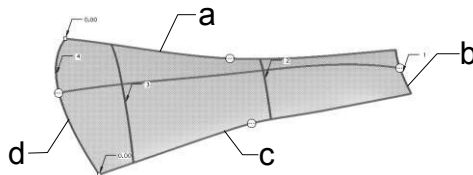


Bild 3: Beispiel für ein Creo Berandungsverbund-Feature



In Kombination mit dem Feature Verbundvolumen wird die flexible Flächenbeschreibung eines oder mehrerer Berandungsverbund-Features mit den ursprünglichen Volumen-Features des Modells verschmolzen. Dies ermöglicht die Oberflächenanpassung der Optimierung als neues „Gestaltänderungs“-Feature in die Modellhistorie einzubringen.

Als geometrische Grundelemente für die Erzeugung der Berandungsverbund-Features sind zwei oder mehrere Berandungskurven erforderlich (Kurven a, b, c, d in Bild3). Optional können zur weiteren Anpassung in Bezug auf die erforderliche Abbildungsgenauigkeit bzw. Flexibilität beliebig viele Querschnitte innerhalb der Fläche definiert werden. Dabei lässt sich feststellen, dass eine zu genaue Nachbildung des Formoptimierungsnetzes durch eine höhere Anzahl von Schnittkurven zu Krümmungssprüngen aufgrund der zerklüfteten Netzoberfläche führen kann. Dies ist hinsichtlich der Fertigbarkeit nicht immer zielführend. Durch die Verwendung einer geringeren Kurvenanzahl sinkt zwar die Abbildungsgenauigkeit, die resultierende Fläche zeichnet sich jedoch durch eine höhere „Glätte“ aus. Es ist die Aufgabe des Konstrukteurs zu entscheiden, welche Details der Gestaltoptimierung abgebildet werden sollen und der Fertigbarkeit des Bauteils zuträglich sind.

Dies führt zur Frage, wie die Basiskurven für die Berandungsverbund-Features im Analyseschritt erzeugt werden können. Um die Oberflächentopologie und damit die ursprüngliche Konstruktionsabsicht beizubehalten, ist es zielführend, diese Kurven direkt aus der vorhandenen CAD-Oberfläche zu extrahieren. In Bild4 sind die Körperkanten (schwarze Kurven) des Ursprungsmodells und der als Polygonnetz importierte Änderungsbereich dargestellt.

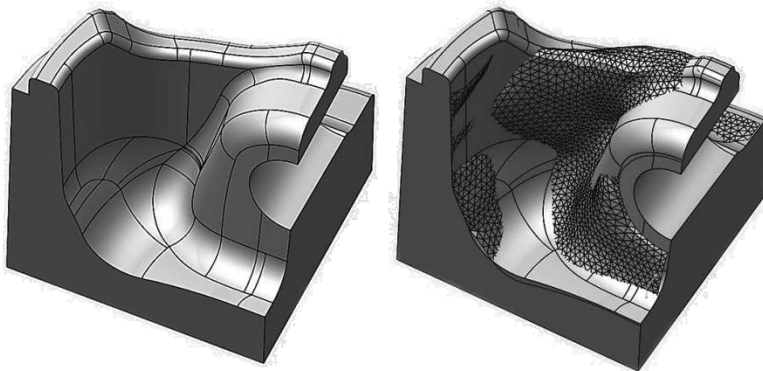


Bild 4: Oberflächentopologie und importiertes Änderungsnetz



Dazu werden zunächst die Tesselierungspunkte der Körperkanten im Änderungsbereich in einer neuen Datenstruktur hinterlegt. Die zum Änderungsbereich gehörigen Flächen können über die Zuordnung zum ebenfalls verfügbaren unveränderten Oberflächennetz identifiziert werden. Innerhalb der angelegten Datenstruktur wird zwischen Verbindungspunkten, d. h. Punkten die mehrere Kanten miteinander verbinden und Punkten die auf einer Kante liegen, unterschieden. Mit Hilfe dieser Information können in einem weiteren Schritt flexible Splinekurven erzeugt werden, welche die Formänderung abbilden und die Ausgangsbasis für die Berandungsverbund-Features bilden. Zunächst ist es für den Featuremapping Schritt softwareseitig sinnvoll, die Projektion der Stützpunkte auf das Optimierungsnetz vor die Erzeugung der eigentlichen Features zu ziehen.

Die Projektionsrichtung für die Verschiebung der Stützpunkte wird aus der Oberflächennormale ermittelt. Dazu wird für jeden Kanten-Punkt die Vektorsumme der Flächennormalen für die jeweils angrenzenden Flächen im Stützpunkt selbst gebildet. Für die Berechnung der neuen Stützpunktkoordinaten, d. h. dem Schnittpunkt zwischen Polygonnetz und dem Projektionsvektor, wird ein so genanntes Ray-Tracing Verfahren eingesetzt. Algorithmen dieser Art stammen ursprünglich aus Rendering Anwendungen. Bei dem hier beschriebenen Verfahren wurde der in [14] beschriebene Ansatz umgesetzt. Damit liegen alle Basis-Informationen vor um das angepasste Splinegitter und die Berandungsverbund-Features zu erzeugen. In Bild5 sind die Ergebnisse des Verschiebungsschritts und ein Ausschnitt der Projektionsvektoren für die Stützpunkte dargestellt. Im Vergleich zu Bild4 wird deutlich, dass die ursprüngliche Oberflächentopologie nahezu vollständig erhalten bleibt.

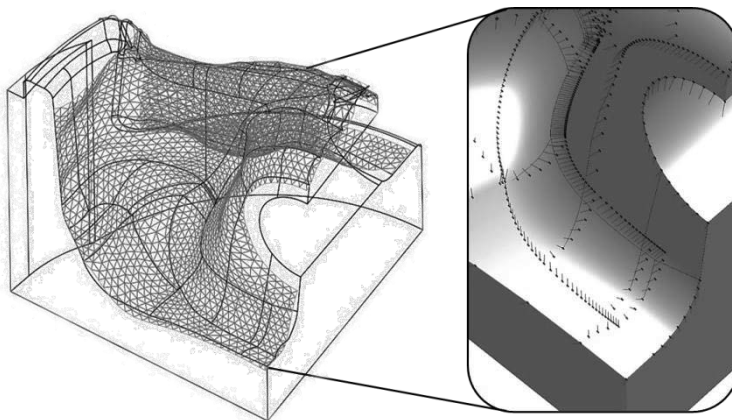


Bild 5: Angepasste Oberfläche und Projektionsvektoren



---

Mit diesem Schritt liegen alle Elemente vor, um die Optimierungsergebnisse als Gestaltänderungs-Feature in die Historie des Modells zu integrieren. Die prototypische Implementierung des hier vorgestellten Rückführungsansatzes erfolgte über die Programmierschnittstelle Pro/Toolkit des CAD-Systems Creo Elements/Pro 5.0 in enger Zusammenarbeit mit der B&W Software GmbH. Die Module des Systems können direkt über die grafische Benutzeroberfläche von Creo gesteuert werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz zur automatisierten CAD-integrierten Rückführung von Konstruktionsgeometrie aus Formoptimierungsergebnissen vorgestellt. Somit können Gestaltänderungen aus der Formoptimierung auch ohne vertieftes Erfahrungswissen im ursprünglichen CAD-Modell abgebildet werden. Da alle Features des ursprünglichen Modells vollständig erhalten bleiben und die Anpassungen ebenso über ein Feature repräsentiert werden, bleibt das Modell anpassbar. Es tritt kein Informationsverlust hinsichtlich der ursprünglichen Konstruktionsabsicht auf.

In der aktuellen Implementierungsstufe fehlen noch die für ein Konstruktionsassistenzsystem typischen Änderungsfunktionen um z. B. die erzeugten Elemente hinsichtlich Abbildungsgenauigkeit oder Fehlstellen anzupassen oder auch neue Elemente über einen Merkmaleditor zu ergänzen. Zudem ist diese Funktionalität auf Grund von Fehlern, die während des automatischen Prozesses auftreten und manuell nachgebessert werden müssen, erforderlich. Hier wäre auch ein wissensbasierter Ansatz für einen Fehlerassistenten denkbar.

Des Weiteren soll das System dahingehend weiterentwickelt werden, dass alle Freiformkurven durch vom Konstrukteur beherrschbare Querschnitte ersetzt und angepasst werden können. Dazu wird in [10] ein Ansatz in der „*sectional feature-based strategy*“ vorgestellt, durch welchen die Approximation von Freiformkurven durch Skizzenelemente, wie Radien, Geraden etc. und deren Randbedingungen ermöglicht wird. Dadurch kann die nachträgliche Anpassbarkeit deutlich gesteigert werden.

## Danksagung

Die Autoren möchten an dieser Stelle dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Forschungsprojekts ShapeOpt2CAD (Förderkennzeichen 01|S11023E) danken. Weiterhin möchten sich die Autoren bei der Federal-Mogul Nürnberg GmbH bedanken, mit deren Genehmigung die Bilder der Kolbenmodelle verwendet werden dürfen.

---

## Literatur

- [1] Wöhrle, B.; Brauner, R. et al.: "Systemleichtbau durch Strukturoptimierung", *Lightweight Design*, Nr. 03/2013, S. 28–32.
- [2] Firl, M.; Fischer, M. et al.: "Innovative Formoptimierung in der Fahrzeugentwicklung", *ATZ*, Bd. 114, Nr. 03/2012, S. 224–229.
- [3] Pahl, G.; Beitz, W.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [4] Schumacher, A.: "Optimierung Mechanischer Strukturen - Grundlagen und industrielle Anwendungen", Springer Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
- [5] Harzheim, L.; Graf G.; et al.: "Topologieoptimierung im praktischen Einsatz", *ATZ*, Bd. 101, Nr. 07/08/1999, S. 530–539.
- [6] Choi K. K.; Kim N. H.: "Structural sensitivity analysis and optimization", Springer Science+Business Media, New York, 2005.
- [7] Harzheim L.: "Strukturoptimierung: Grundlagen und Anwendungen", Harri Deutsch Verlag, Frankfurt am Main, 2008.
- [8] N.N.: Geomagic. URL <http://www.geomagic.com/>. – Aktualisierungsdatum: 15.07.2013.
- [9] Chang, K.-H.; Chen, C.: "3D Shape Engineering and Design Parameterization", *Computer-Aided Design and Applications*, Bd. 8, Nr. 5/2011, S. 681–692.
- [10] Ke, Y., Fan, S. et al.: "Feature-based reverse modeling strategies" *Computer-Aided Design*, Bd. 38, Nr. 5/2006, S. 485–506.
- [11] Wartzack, S.; Meerkamm, H.: "Durchgängige Rechnerunterstützung in der Produktentwicklung aufgrund des Einsatzes semantisch hochwertiger Features", *Konstruktion*, Nr. 3/2000, S. 24–26.
- [12] Langerak, T. R.: "Local parameterization of freeform shapes using freeform feature recognition", *Computer-Aided Design*, Bd. 42, Nr. 8/2010, S. 682–692.
- [13] Vajna, S.: *Cax für Ingenieure: Eine Praxisbezogene Einführung*, Springer, Berlin, 2009.
- [14] Akenine-Moller, T.; Haines, E; Hoffman, N.: "Real-Time Rendering", A K Peters/CRC Press, Wellesley, 2008.

## Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Systemgrenzengestaltung bei dynamischen Versuchen

O. Rasmussen, B. Plaumann, D. Krause  
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT)*  
*Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)*

### 1 Dynamische Versuche mit Leichtbaustrukturen

Der Forderung nach immer mehr Gewichtseinsparung kann insbesondere in der Luftfahrtbranche nur durch konsequenten Leichtbau entsprochen werden. Für die Auslegung der Bauteile ist die Verwendung numerischer Simulationsmodelle weit verbreitet; jedoch können Realversuche zur Validierung und Optimierung von Simulationsmodellen sowie zur Erprobung des finalen Konzepts nicht ersetzt werden. Insbesondere bei komplexen Strukturen mit nicht-linearem Werkstoff- oder Strukturverhalten ist die Ermittlung ergebniskritischer Kenngrößen oftmals nur experimentell möglich. Insbesondere das Verhalten von Faserverbundstrukturen unter dynamischen Lasten unterliegt einer Menge an Einflussfaktoren, welche nur schwer ermittel- und abbildbar sind, so dass Realversuche zu lokalen Details wie auch dem globalen Gesamtverhalten unabdingbar sind. Zudem werden in vielen Zulassungsrichtlinien lediglich Realversuche als Nachweis einer Struktur akzeptiert. Für große bzw. komplexe Strukturen kommen hier oft vereinfachte und daher mit Sicherheitsfaktoren beaufschlagte Versuche zum Einsatz, da die praktische Durchführung realitätsnaher Versuche hohe Anforderungen an die verwendete Prüftechnik stellt. Der von der DFG geförderte Hexapod-Großprüfstand der Technischen Universität Hamburg-Harburg erlaubt durch seine spezielle Konstruktion die Durchführung dynamischer Versuche auch an großen Leichtbaustrukturen wie z.B. ganzen Flugzeugbordküchen. Aufgrund seiner Kinematik mit sechs vonei-

ander unabhängigen Freiheitsgraden können ein- und mehrachsige Belastungszustände realitätsnah abgebildet werden; auf eine erhöhte Abstraktion der Versuchsbedingungen kann hier demzufolge oftmals verzichtet werden. Auf diesem Prüfstand (siehe Bild 1) wurde bereits eine Vielzahl von dynamischen sowie quasistatischen Versuchen mit unterschiedlichen Leichtbaustrukturen durchgeführt. Nähere Informationen dazu (inkl. technischer Daten des Prüfstands) finden sich in [1].



Bild 1: Versuche mit unterschiedlichen Leichtbaustrukturen auf dem Hexapod.

## 2 Einflussfaktoren auf den Versuch

Wie bereits in [2] dargestellt, existiert eine Vielzahl von Einflussfaktoren, welche die Ergebnislage und somit die Aussagekraft der generierten Testergebnisse maßgeblich beeinflussen. Diese sollen im Folgenden näher spezifiziert und detailliert werden.

Mechanische Bauteilversuche lassen sich unter anderem nach dem zeitlichen Verlauf der aufgebrachtten Belastung unterscheiden. Bei den zumeist mit geringerem Aufwand durchzuführenden und daher weiter verbreiteten quasistatischen Bauteiltests liegen geringe Änderungsgeschwindigkeiten der Last vor. Hier stehen „klassische“ Anforderungen wie z.B. Festigkeit und Steifigkeit der Testumgebung im Vordergrund. Bei dynamischen Versuchen ändern sich die Lastgrößen im Zeitverlauf mit vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten; es treten zu den bereits genannten "klassischen" eine Vielzahl zusätzlicher Einflussfaktoren wie z.B. Dämpfung oder Frequenzgang des Prüfaufbaus bzw. des Gesamtsystems in den Vordergrund. Der Fokus soll hier auf die dynamischen Versuche gelegt werden, da hier eine größere Anzahl von Einflussfaktoren und somit größere Unsicherheiten vorliegen als bei den vergleichsweise gut beherrschbaren quasistatischen Versuchen. Im Folgenden werden einige wichtige Einflussfelder dargestellt.



## 2.1 Modifikationen am Prüfling

Zur Anpassung an die Prüfumgebung ist es aus praktischen Gründen oftmals unumgänglich, am Prüfling selber gewisse Modifikationen vorzunehmen. Sollen beispielsweise an Sandwichpanels, welche normalerweise flächig angebunden sind, Schnittkräfte bestimmt werden, so muss eine punktförmige Anbindung realisiert werden. Hierzu müssen Anbindungselemente montiert werden, was eine Veränderung der ursprünglichen Struktur des Prüflings darstellt. In Bild 2 ist eine solche für den Versuch erforderliche Krafteinleitungsstruktur abgebildet. Hier wurde ein Sandwichpanel über eine aufgeklebte Metallschiene an eine Kraftmessdose angebunden. Eine Änderung des dynamischen Verhaltens wurde in diesem Fall in Kauf genommen, da die Schnittkräfte bestimmt werden sollten, weswegen die Struktur nicht – wie in der Realität – über ihre Außenflächen angebunden werden konnte. Ein zusätzliches Element zur Kraftverteilung auf den Umfang des Panels hätte durch seine Masse das Messergebnis zusätzlich verfälscht. In einem solchen Fall müssen die Konsequenzen der Modifikation gegen ihre Vorteile abgewogen werden, um die bestmögliche Vorgehensweise zu finden. Zudem muss geprüft werden, ob ggf. bestimmte Einflüsse aus den Messergebnissen herausgerechnet werden können. Im dargestellten Beispiel ist es durch eine Entkopplung der Anbindung (siehe auch [3]) möglich, das Schwingverhalten und den Masseneinfluss der Anbindung aus dem Messergebnis zu entfernen.

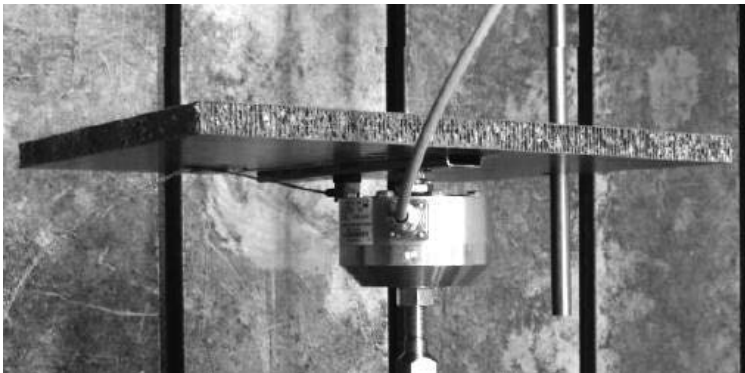


Bild 2: Für den Versuch angebrachte Krafteinleitung an einem Sandwichpanel

## 2.2 Beladung

Gerade im Flugzeuginterieurbereich liegt die Masse von Beladungselementen (Elemente, welche nicht zur Struktur eines Bauteils zählen, aber zu deren

Belastung beitragen) in derselben Größenordnung wie die der zu untersuchenden Struktur, was einen deutlichen Einfluss auf die Eigenfrequenzen des Prüflings hat. Zudem werden die zu untersuchenden Strukturen bei Schwingversuchen häufig im Bereich ihrer ersten Eigenfrequenz angeregt. Es lässt sich somit häufig erkennen, dass der Einfluss von Beladungselementen auf das Testergebnis relevant ist. Oftmals ist es aus hygienischen, logistischen oder sonstigen Gründen nicht möglich, die Originalbeladung zu verwenden, weswegen Dummylasten zum Einsatz kommen. Hierbei handelt es sich um Elemente, deren Masse und dynamisches Verhalten möglichst nahe an denen der Originalbeladung liegen sollten. Insbesondere die Untersuchung der Einkopplung der resultierenden Kräfte in die umgebende Struktur stellt hierbei eine Herausforderung dar. Links in Bild 3 sieht man die Ersatzbeladung eines Standardcontainers, in welchem in Passagierflugzeugen beispielsweise Speisen und Getränke verstaut werden. Es wurden Wasserflaschen verwendet, da Getränkeflaschen auch im Original einen Großteil der Beladungsmasse ausmachen. Außerdem kamen Papierblöcke zum Einsatz, um die erhöhte innere Dämpfung von Speisen abzubilden sowie die Beladungsmasse zu ergänzen. Zum Teil werden sogar ganze Einbauteile wie z.B. Öfen mitsamt ihrer Beladung durch Dummies ersetzt (rechts in Bild 3). Der Einfluss des Austausches der Originalbeladung durch diese Dummylasten auf das Versuchsergebnis ist schwer vorherzusagen, da möglicherweise ein unterschiedliches Schwingverhalten der untersuchten Struktur vorliegt.



Bild 3: Beispiele von Dummylasten zur Beladung von Standardcontainern (links) und Ofen-Dummies (rechts)

Erste Versuche mit Zeitschriftenhaltern bzw. einem hölzernen Dummy gleicher Masse an Sandwichpanels (Bild4) zeigen, dass ein vollkommen unterschiedliches Dämpfungsverhalten vorliegt. Versuche mit demselben Zeitschriftenhalter bzw. seinem Dummy an einem Panel mit den Abmessungen 1m x



2,3m haben beispielsweise eine Veränderung der Systemdämpfung um den Faktor 2,5 gezeigt. Bei dynamischen Untersuchungen ist dies demzufolge ein ernstzunehmender Einflussfaktor, der zudem schwer zu quantifizieren ist. Weitere Untersuchungen sollen in Zukunft dabei helfen, den Einfluss von Beladungsdämpfung besser abzuschätzen.



Bild 4: Zeitschriftenhalter bzw. Dummy an Sandwichpanel

## 2.3 Anbindung

Im Gegensatz zur Beladung, bei welcher die Wahl der Dummylasten aus einem breiten Spektrum an Alternativen erfolgen kann, unterliegen Anbindungsstrukturen strengeren Restriktionen. Hier müssen zumeist die vorhandenen Schnittstellen berücksichtigt werden. Auch existieren oftmals Erfahrungswerte aus vorangegangenen (statischen) Versuchen. Des Weiteren entscheidet die Zielsetzung des Versuchs über die Art und Anzahl der Anbindungen: soll eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Originalumgebung des Prüflings zur zuverlässigen Erprobung bereitgestellt werden, oder aber eine möglichst steife Anbindung zwecks einfachem Abgleich mit FEM-Modellen realisiert werden?

Da das exakte Abbilden des dynamischen Verhaltens der den Prüfling umgebenden Originalstruktur in den meisten Fällen nicht möglich ist, wird häufig eine möglichst steife Anbindungsstruktur gewählt, da die Ergebnisse des Versuchs so einfach nachvollzogen werden können. Zudem spielt der Abgleich von Simulation und Realität eine immer größere Rolle, welcher mit steifen Anbindungen ebenfalls vereinfacht wird.

Der Einfluss von Fügstellen auf das dynamische Verhalten von komplexen Strukturen ist bislang wenig untersucht [4], so dass also auch hier eine weitere Variable hinzukommt. Werden zu den bereits vorhandenen Schnitt-

---

stellen noch weitere Anbindungspunkte benötigt (siehe 2.1), kann es zudem zu Veränderungen im modalen Verhalten des Prüflings selber kommen, da so evtl. Moden eingeschränkt werden, die sonst frei schwingen könnten [4].

## 2.4 Messstellen

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Anbindungen stellen oftmals auch Messstellen dar, da man die Schnittstellenkräfte zwischen Prüfling und umgebender Struktur kennen möchte. Zur Untersuchung des Frequenzverhaltens benötigt man jedoch häufig weitere Messstellen, an denen Kräfte, Wege oder Beschleunigungen ermittelt werden. Die Wichtigkeit der geeigneten Messstellenwahl wird in [5] dargestellt. Die Auswahl, Lage und Beschaffenheit der Messstellen haben Einfluss auf das Messergebnis; zudem resultieren aus Ihnen weitere Anforderungen an die Gestaltung des Prüfaufbaus, da ggf. Anbindungselemente oder Halterungen für Kabel vorgesehen werden müssen.

## 2.5 Systemgrenzen

Eine sehr wichtige Rolle in Bezug auf das Testergebnis spielt die Wahl und Lage der Systemgrenzen. Wie in [6] dargestellt, hat die umgebende Struktur insbesondere bei niedrigen Frequenzen einen deutlichen Einfluss auf das dynamische Verhalten des Prüflings. Bei höheren Frequenzen setzen zunehmend Entkopplungseffekte ein. Da die zu untersuchenden Frequenzen von Flugzeuginterieurstrukturen, welche beispielsweise aus dem Windmilling resultieren, eher im Niederfrequenten Bereich ( $< 40$  Hz) angesiedelt sind, ist der Einfluss der Systemgrenzen hier nicht zu vernachlässigen. Im Sinne des Versuchsaufwands ist es für gewöhnlich nicht praktikabel, die komplette Umgebungsstruktur (also hier den Flugzeugrumpf) in den Versuch mit einzubeziehen. Dies wird lediglich bei den sogenannten "ground vibration tests" praktiziert, wobei die komplette Flugzeugstruktur an ausgewählten Stellen mittels elektrodynamischer Shaker unidirektional mit geringer Amplitude und geringem Energieeintrag angeregt wird, um beispielsweise das Flatterverhalten eines Flugzeugs zu evaluieren [7]. Außerdem gibt es Schwingversuche mit einer Rumpfsektion, in welche Interieurbauteile eingesetzt und dynamischen Lasten unterworfen werden. Abgesehen davon, dass hierfür sehr große Prüfstände erforderlich sind, bleibt fraglich, inwieweit sich das dynamische Verhalten eines kompletten (geschlossenen) Flugzeugrumpfes mittels einer offenen Sektion abbilden lässt. Um das Problem der Abbildung des dynamischen Verhaltens der umgebenden Struktur zu lösen, wird in [6] vorgeschlagen, deren Einfluss mittels aktiver Systeme im Prüfstand nachzubilden. Dies setzt voraus, dass man das dynamische Verhalten der umgebenden Struktur genau kennt und die Anzahl und Art der abzubildenden Freiheitsgrade im realisierbaren Rah-

men bleibt. Da dies mit steigender Komplexität des Systems immer schwieriger wird, besteht die Alternative im bewussten Legen der Systemgrenzen unter Abschätzung des Einflusses auf das zu erwartende Testergebnis. Hier stellt sich die Frage, inwieweit sich der Einfluss der Abstraktionsebene auf das Versuchsergebnis bestimmen und ob sich ein Optimum zwischen den beiden Extremen „Test des kompletten Systems mit relevanter Umgebung“ (großer Umfang) und „Test eines isolierten Teils“ (große Abstraktion) finden lässt, da man hierbei immer einen Kompromiss finden muss. Dies ist in Bild5 mit einigen beispielhaften Abstraktionsebenen aus dem Flugzeugbereich dargestellt.

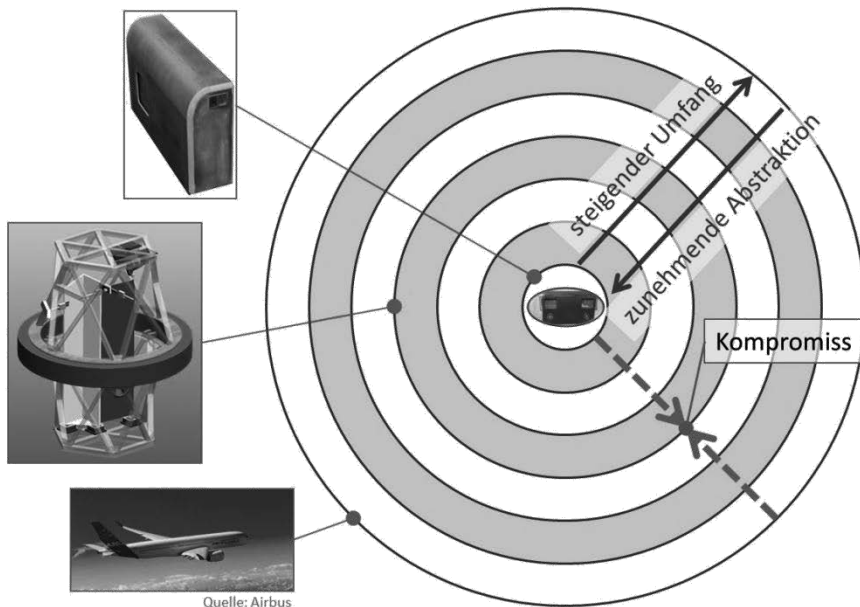


Bild 5: Wahl der Abstraktionsebene

## 2.6 Verzahnung von Simulation und Versuch

Eine kombinierte Herangehensweise aus Simulation und Versuch verspricht in den meisten Fällen eine schnellere und präzisere Beantwortung der relevanten Fragestellungen, als es eine von beiden Vorgehensweisen allein könnte [4]. Durch die enge Verzahnung von Simulation und Versuch ergeben sich weitere Anforderungen, um ein optimiertes Zusammenspiel zu erreichen. Sollen beispielsweise bestimmte Kenngrößen aus Versuchen als Eingabegrößen in die Simulation eingehen oder aber zur Validierung des Modellverhaltens dienen, so muss eine übergreifende Architekturdefinition zumindest der

relevanten Schnittstellen für das Simulationsmodell und den Versuchsaufbau gefunden werden. Außerdem können simulativ im Vorfeld ermittelte Größen die Entwicklung der Versuchsumgebung vereinfachen, da hiermit beispielsweise Lasten oder Verformungen bereits vor dem Realversuch abgeschätzt werden können. Um dieses Zusammenspiel zu erleichtern, ergeben sich aus den genannten Einflussfeldern die in Tabelle 1 zusammengefassten Anforderungen an beide Seiten.

Tabelle 1: Gliederung der Einflussfaktoren

<b>Einflussfeld</b>	<b>Anforderungen an die Simulation</b>	<b>Anforderungen an den Versuch</b>
<i>Modifikationen am Prüfling</i>	Anpassbarkeit der Modellgeometrie / Geeignete Modellsubstrukturierung	Anbindung gewährleisten
<i>Beladung</i>	Einkopplung der Beladung realitätsnah ermöglichen	Dummyslasten möglichst realitätsnah wählen
<i>Anbindung</i>	keine	Steife Prüfumgebung
<i>Messstellen</i>	keine	Störeinflüsse minimieren
<i>Systemgrenzen</i>	Detaillierungsgrad von umgebenden Strukturen anpassen	Systemgrenzen sinnvoll wählen, Einfluss abschätzen
<i>Verzahnung von Simulation und Versuch</i>	Austauschbarkeit von Subsystemen	Austauschbarkeit von Subsystemen

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass bei der Gestaltung dynamischer Bauteilversuche an komplexen Sandwichstrukturen eine Vielzahl von Einflussfaktoren zu berücksichtigen ist. Neben Restriktionen bzgl. Masse und Bauraum muss die Messgrößenermittlung an den gewünschten Punkten und oftmals auch eine Austauschbarkeit von Komponenten bzw. eine einfache Anpassung an mehrere Prüflinge berücksichtigt werden. Soll ein Abgleich zwischen Simulation und Versuch erfolgen, kommen zu den versuchsseitigen noch weitere Anforderungen hinzu. Die oft nicht zu vermeidenden Modifikationen und Abstraktionen beeinflussen die Versuchsergebnisse ebenso wie die Wahl der Systemgrenzen



und der Abstraktionsebene. Im weiteren Vorgehen soll versucht werden, eine Möglichkeit zur Quantifizierung der Effekte der einzelnen Einflussfaktoren zu finden, um daraus Handlungsempfehlungen für die Gestaltung dynamischer Versuche und insbesondere für die Wahl der Abstraktionsebene abzuleiten. Hierzu ist geplant, Sensitivitätsanalysen anhand von Variationen einzelner Parameter bei einfachen Systemen / Modellen durchzuführen, um daraus Erkenntnisse abzuleiten, welche dann an komplexeren Systemen bzw. Modellen überprüft und geschärft werden. Diese Erkenntnisse können zur weiteren Verfeinerung der Untersuchungen auf Komponenten einfacherer Systeme und Modell zurückgeführt werden, um die Vorhersagegenauigkeit zu erhöhen.

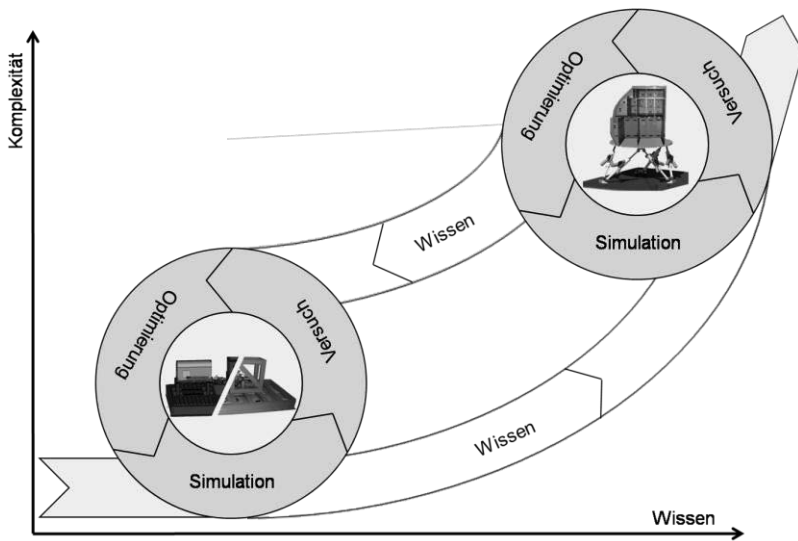


Bild 6: Iteratives Vorgehen über mehrere Komplexitätsebenen

Auf diese Weise soll eine Vorgehensweise entwickelt werden, die zur Unterstützung des konsequenten Leichtbaus eine optimierte Strategie zur Durchführung dynamischer Versuche an Leichtbaustrukturen bereitstellt. Der Einfluss der genannten Einflussfaktoren soll bereits im Vorfeld besser abgeschätzt werden können, um eine höhere Zuverlässigkeit und Ergebnisgüte der experimentellen dynamischen Untersuchungen zu ermöglichen, da nur so ein konsequentes Ausschöpfen des Leichtbaupotentials beispielsweise zukünftig zu entwickelnder Flugzeuginterieurstrukturen erreicht werden kann.

---

## Literatur

- [1] Krause, D.; Gumpinger, T.: "Hexapod-Großprüfanlage", Konstruktion, ISSN 0720-5953, Ausgabe 6/2013, p. 61.
- [2] Rasmussen, O.; Plaumann, B.; Seemann, R.; Krause, D.: "Untersuchungen von varianten Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten", Design for X, Beiträge zum 23. Symposium, Bamberg, 2012, pp. 135-150.
- [3] D'Ambrogio, W.; Fregolent, A.: "Direct decoupling of substructures using primal and dual formulation.", Linking Models and Experiments, Volume 2, Springer, New York, 2011, pp. 47-76.
- [4] Geisler, J.: "Numerische und experimentelle Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Strukturen mit Fügestellen", Technische Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2010.
- [5] Penny, J.E.T; Friswell, M.I.; Garvey, S.D.: "Automatic choice of measurement locations for dynamic testing", AIAA Journal, Vol. 32, No. 2, 1994, pp. 407-414.
- [6] Baschke, M.; Sachau, D.: "Control of Mechanical Impedance as boundary condition for testing substructures", Proceedings of the 4th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST 2013), Hamburg, 2013.
- [7] Balmès, E.; Wright, J.: "GARTEUR group on ground vibration testing. Results from the test of a single structure by 12 laboratories in Europe.", Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales, 1997.

## Methoden für die Entwicklung modularer Produkte bei der Jungheinrich AG

Dr. Julia Lechnitz  
*Grundlagenentwicklung  
Jungheinrich AG*

Sandra Eilmus  
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Technische Universität Hamburg-Harburg*

### 1 Einleitung

Die Jungheinrich AG ist einer der drei größten Anbieter in den Bereichen Flurförderzeug-, Lager- und Materialflusstechnik weltweit. Jungheinrich bietet eine stetig wachsende Variantenvielfalt an, damit die Kundenwünsche „rund um den Stapler“ bedient werden können. Um die daraus resultierende Komplexität beherrschbar zu halten, werden modular aufgebaute Fahrzeuge entwickelt. Weitere Potentiale zur Minimierung der internen Varianz sollen erzielt werden, indem Module gezielt für den produktfamilienübergreifenden Einsatz entwickelt werden. Nach der Erläuterung von Begriffsverwendungen im ersten Abschnitt werden im zweiten Abschnitt methodische Ansätze anhand eines Beispiels erläutert. Diese Methoden sollen zukünftig während der Produktentwicklung eingesetzt werden können.

---

## 2 Begriffserläuterungen

Die Idee zur Modularisierung wird durch die Entwicklungsabteilungen vorangetrieben. Der Ansatz ist, dass frühzeitig durch die Anwendung von Methoden und die Einhaltung von Prozessvorgaben die Entwicklung von Fahrzeugen einer modularen Produktfamilie unterstützt werden soll. Mit Hilfe der Methoden soll es möglich sein, die unterschiedlichen Bedarfe der verschiedenen Lebensphasen wie Einkauf, Entwicklung, Produktion und weitere zu berücksichtigen.

Aufgrund der Unternehmensstruktur mit mehreren dezentralen Entwicklungsabteilungen ist es zunächst sinnvoll, eine einheitliche Begriffsdefinition zu finden und eine gemeinsame Begriffsverwendung zur Modularisierung zu etablieren.

**Komponenten** werden im spezifischen Kontext als kleinste ganze Einheit betrachtet. Bei der **Modularisierung** werden Komponenten zu einem **Modul** zusammengefasst um spezifische Vorteile im Produktleben zu erzielen. Diese entstehen nach Krause et al. [1] dadurch, dass folgende Eigenschaften zu einem gewissen Grad bei der Definition und Entwicklung des Moduls entsprechend angestrebter Vorteile ausgeprägt werden:

- Die **Gemeinsame Verwendung** von Modulen beschreibt die Nutzung von gleichen Modulen in verschiedenen Produkten.
- Die **Konfigurierbarkeit** von Modulen beschreibt die Möglichkeit, verschiedene Produktvarianten zu erzeugen, indem Module aus einem gegebenen Baukasten ausgetauscht und verknüpft werden.
- **Schnittstellenstandardisierung** bedeutet, dass unterschiedliche Module an gleichbleibende oder unterschiedliche Module auf die gleiche Weise angeschlossen werden. Dazu müssen sie auf die gestalterisch gleiche Weise Material und Signale austauschen sowie strukturell angebunden sein.
- **Funktionsbindung** bedeutet, dass jede Funktion eines Produktes durch ein bestimmtes Modul realisiert wird. Ein Modul kann dabei eine oder mehrere Funktionen bedienen.
- Module sind voneinander **entkoppelt**, wenn sie einfache und wenig Schnittstellen zueinander haben. Innerhalb eines Moduls können die Komponenten beliebig stark miteinander gekoppelt sein.

Modularisierung von Produktfamilien kann in zwei Betrachtungsumfängen durchgeführt werden. Zum einen kann die Modularisierung in einer Produktfamilie verfolgt werden, indem bei dem Produkt selbst die bestehenden oder zukünftigen Komponenten in (neue) Module eingeteilt und entsprechend gestaltet werden. Zum anderen ist es möglich innere Varianz zu minimieren, indem diese Module zur gemeinsamen Verwendung über einzelne Produktfamilien hinaus entwickelt werden. Dies wird ermöglicht, indem Module und ihre Varianten in sich modular gestaltet werden und die Nutzung von Kommunalität im Prozess durch die Gestaltung ermöglicht wird.

Bild 1 zeigt die Einordnung dieser modularen Gestaltung in der Produktstruktur des Staplers am fiktiven Beispiel der Bedieneinheit. Die Bedieneinheit ist ein Modul, das z.B. in 15 verschiedenen Varianten in allen Staplern Verwendung findet (1. Ebene). Die Entwicklung einer einheitlichen Bedieneinheitenfamilie ermöglicht es, alle Stapler aus drei Varianten zu bedienen, die aus einem gemeinsamen Komponentensatz modular konfiguriert werden können. In Bezug auf die Betrachtung eines einzelnen Moduls wie der Bedieneinheit (2. Ebene), werden entsprechend Komponenten wie beispielsweise Summer, Widerstand und Platine in ein gemeinsames Platinenmodul integriert. So können Vorteile in der Reduktion von Sachnummern oder durch eine vereinfachte Nachrüstbarkeit von Bedieneinheiten erzielt werden [2].

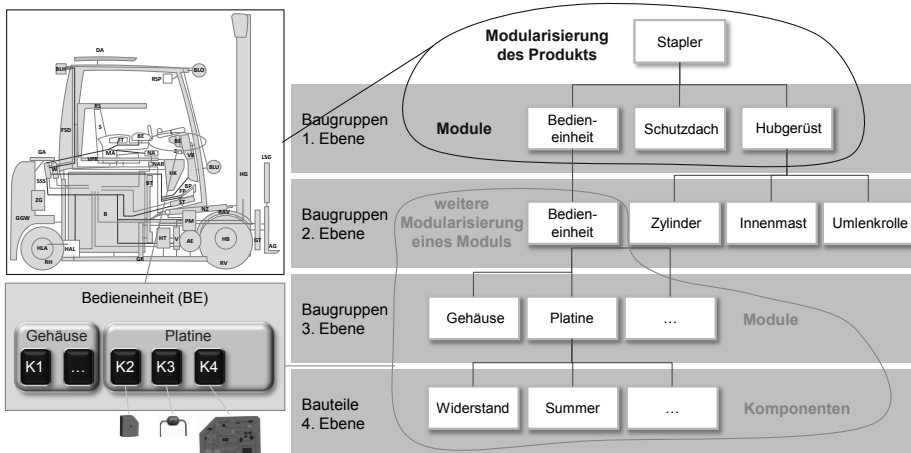


Bild 1: Modularisierung auf verschiedenen Ebenen des Produktes Stapler

---

### 3 Methodeneinsatz

Zurzeit werden einheitliche konstruktionsmethodische Werkzeuge des integrierten PKT-Ansatzes zur Entwicklung modularer Produktfamilien [1] bezüglich ihres Einsatzes auf die oben beschriebenen Anwendungsgebiete untersucht und weiterentwickelt. Die Anwendung der Methoden soll den Entwicklern erleichtern, Module für den übergreifenden Einsatz in mehreren Produktfamilien zu entwickeln. Besondere Herausforderungen entstehen dabei durch technische und funktionale Anforderungen, aufgrund der verschiedenen Ansprüche der unterschiedlichen Lebensphasen wie Einkauf, Entwicklung, Produktion usw. und auch aufgrund verschiedener Standorte weltweit.

Als Beispiel für Methoden, die bei der Produktentwicklung unter den genannten Herausforderungen eingesetzt werden können, können das Carry-over Chart (CoC) [3], der Module Interface Graph (MIG) [4] oder das Module Process Chart (MPC) [4] genannt werden.

#### 3.1 Einsatz des Carry-over Chart

Mit Hilfe des Carry-over Charts (CoC) kann übersichtlich die Wiederverwendung von Komponenten für verschiedene Fahrzeugtypen, Baureihen oder Produktlinien dargestellt werden. Dabei wird unterschieden zwischen Standard-Komponenten „S“, Varianten „V“, optional vorhandenen Komponenten „O“ und deren Kombinationen wie z.B. optional-variant „OV“. Zur Darstellung der Wiederverwendung werden im CoC Verbindungslinien eingefügt und die einzelnen Komponenten farblich codiert. So wird deutlich, ob mehrere Fahrzeuge gleiche Standardkomponenten einsetzen, ob der Variantensatz identisch oder nur teilweise identisch ist und inwieweit der Komponentensatz an Optionen identisch ist. Bild 2 zeigt, wie die einzelnen Komponentenarten im CoC dargestellt werden.

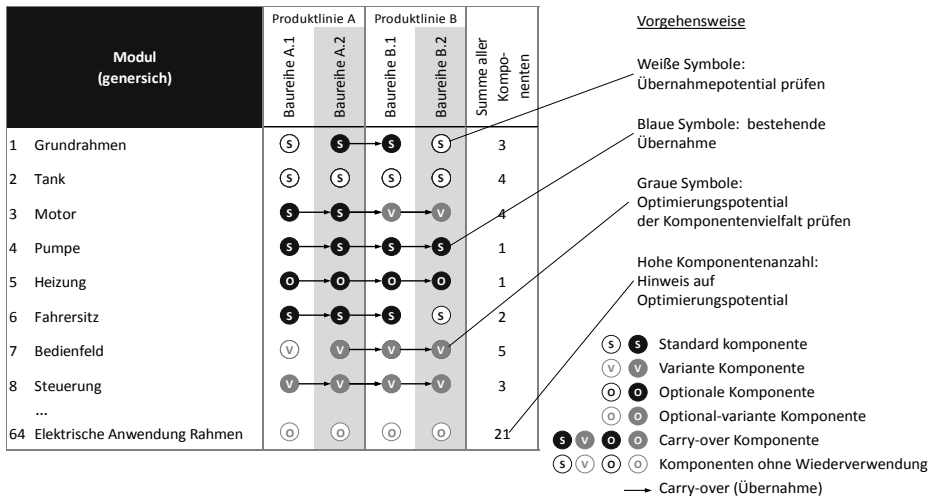


Bild 2: Carry-over Chart CoC [3]

Im ersten Schritt ist der Einsatz des CoC hilfreich, um die Fragestellungen zu klären, ob die gewählten Module im Gesamtkontext der betrachteten Fahrzeuge so geschnitten sind, dass die tatsächliche Produktstruktur soweit übereinstimmt, dass generische Module definieren werden können. Dies erleichtert die Identifikation von produktfamilienübergreifendem Potenzial und ist daher, soweit technisch möglich, anzustreben.

Im zweiten Schritt liegt der Nutzen des CoC darin, dass eine übersichtliche Darstellung von sehr vielen Modulen und ihrer Wiederverwendung in mehreren Fahrzeugen erzeugt werden kann. Durch die Angabe der Variantenanzahlen wird schnell deutlich, bei welchen Komponenten ein Potential zur Variantenminimierung z.B. innerhalb einer Baureihe oder darüber hinaus untersucht werden sollte, wo eine Wiederverwendung aktuell besteht, und wo eventuell noch Potential für zukünftige Wiederverwendung analysiert werden sollte. So ist es zum Beispiel sinnvoll das Modul 64 „Elektrische Anwendung Rahmen“ (vergleiche Bild 2) weiter zu modularisieren, da hier eine hohe Variantenanzahl mit geringer Wiederverwendung vorliegt. Für dieses Beispiel wird im Folgenden der Nutzen des Module Interface Graph (MIG) und des Module Process Charts (MPC) dargestellt.

### 3.2 Einsatz des Module Interface Graph

Bild 3 zeigt das anonymisierte Beispiel des Moduls „Elektrische Anwendung Rahmen“ in Form eines Module Interface Graphs (MIG). Über eine Hal-

terung sind mehrere elektrische Verbraucher an den Fahrzeugrahmen angebracht. Diese Verbraucher sind nicht an allen Fahrzeugen vorhanden, sondern sie können vom Kunden optional und in verschiedenen Varianten bestellt werden.

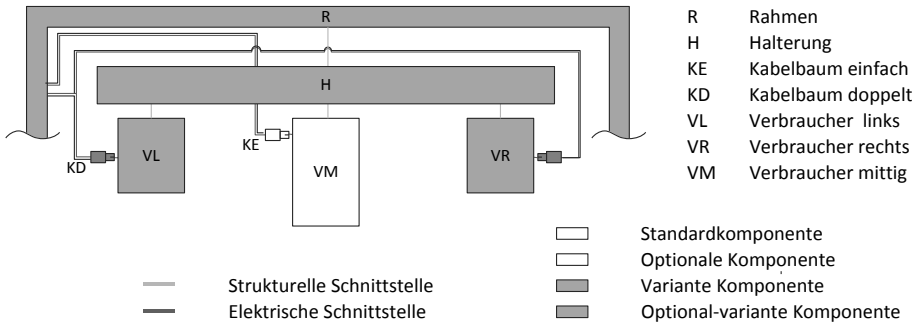


Bild 3: Module Interface Graph des Moduls „Elektrische Anwendung Rahmen“ [5]

Durch den MIG wird für die Komponenten die räumliche Anordnung zueinander veranschaulicht, so dass schnell ein gemeinsames Verständnis über deren Aufbau hergestellt werden kann. Darüber hinaus wird durch die farbliche Codierung der Komponenten die Varianz deutlich, was die Kommunikation erleichtern kann. Zusätzlich werden die Schnittstellen zwischen den Komponenten durch Verbindungen markiert, so dass die Kopplungen der Komponenten zueinander leicht erfasst werden können – z.B. die optionale (gepunktete) Verbindungslinie vom Rahmen (R) über den Kabelbaum einfach (KE) zum mittigen Verbraucher (VM), die in dunkler Farbe in Bild 3 die elektrische Schnittstelle darstellt.

Im vorliegenden Fall entsteht die Varianz dadurch, dass der Kunde wählen kann, ob er die Funktion des mittigen Verbrauchers (VM) und die Funktion der seitlichen Verbraucher (VR und VL) haben möchte (optional). Für die seitlichen Verbraucher kann der Kunde nicht nur wählen, ob er sie haben möchte sondern auch ob diese als Basis-Variante oder als High-Performance-Variante ausgeführt werden soll (optional-variant). Bei der vorliegenden Modularisierungsaufgabe war das Ziel das Modul weiter zu modularisieren um innere Varianz minimieren zu können. Im Rahmen von Workshops basierten Meetings mit Fachexperten wurden Ideen für eine Variantenminimierung mit Hilfe von verschiedenen Darstellungen im MIG aufgezeigt. Beispielsweise ist es möglich die Varianz des Kabelbaums doppelt (KD) zu reduzieren, indem Adapter vorgesehen werden.

### 3.3 Einsatz des Module Process Chart

Mit Hilfe des Module Process Chart (MPC) kann dargestellt werden, welche modulare Struktur in den einzelnen Lebensphasen genutzt wird. Zunächst wird die aktuelle Moduleinteilung der verschiedenen Lebensphasen im Ist-Zustand dargestellt (siehe Bild 4). Hier wurde der ursprüngliche MPC des integrierten PKT-Ansatzes angepasst, um die Variantenzahl der Module in den Lebensphasen darstellbar zu machen.

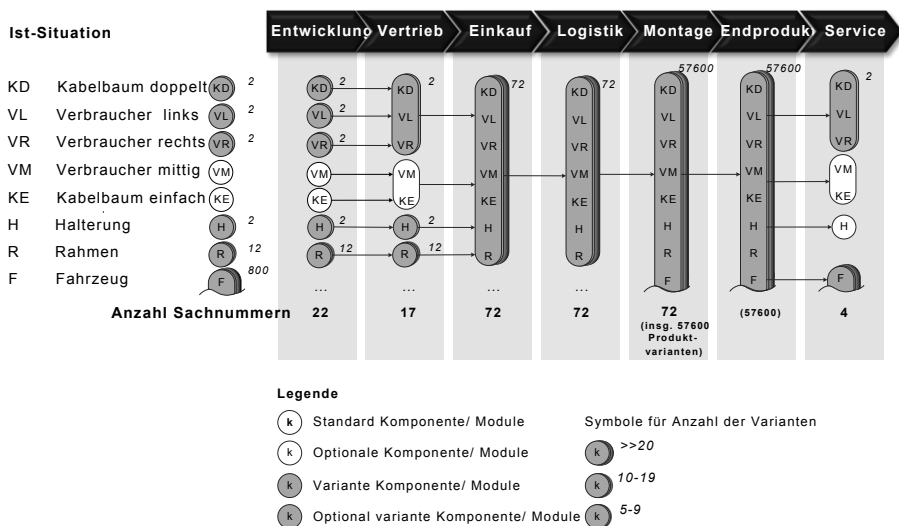


Bild 4: Module Process Chart der Ist-Situation erweitert um die Varianz der Module [5]

In Bild 4 wird demnach ab der Lebensphase Einkauf die Anzahl der zu handelnden unterschiedlichen Sachnummern auf 72 erhöht, da die Kombination aus den 22 Modulen der Entwicklung schon beim Einkauf die Varianten nach oben treiben.

Nach der Neuentwicklung des Konzeptes u.a. mit der oben beschriebenen Adapterlösung und zusätzlich der Möglichkeit zur Vormontage der Verbraucher an eine einheitliche Halterung sieht das MPC des neuen Konzeptes wie in Bild 5 aus. Es wird deutlich, dass durch die Adapterlösung und die Vereinheitlichung des Halters die Anzahl und damit Pflege der Bauteile in der Entwicklung von 22 auf 20 reduziert wurde, wofür eine Überdimensionierung in Kauf genommen werden muss. Zudem ist durch die Möglichkeit der Vor-

montage ein Postponement-Effekt zu erkennen. Dies bedeutet, dass die hohe Anzahl an Varianten erst in einer späten Lebensphase, nämlich bei der Montage auftritt. Mit Hilfe des MPC können diese prozessabhängigen Zusammenhänge anschaulich dargestellt werden, so dass der Aufbau und die Varianz der Module prozessgerecht gestaltet werden können.

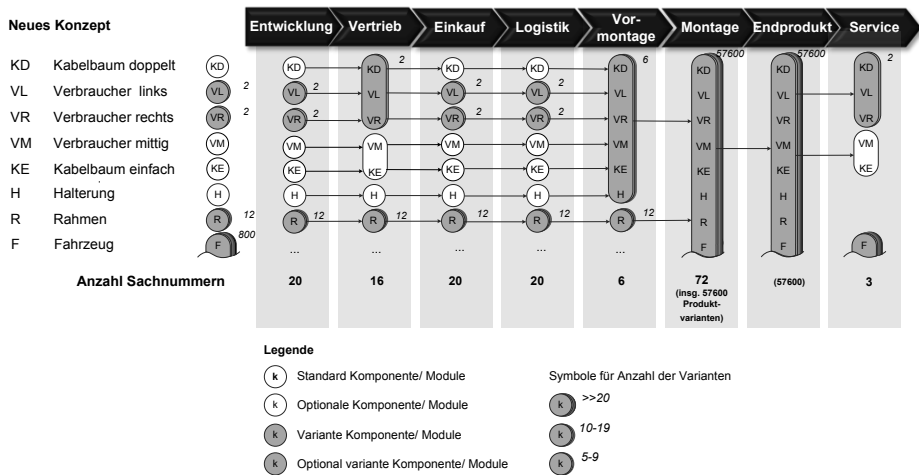


Bild 5: Module Process Chart des neuen Konzepts mit Postponement der Variantenentstehung in die Montage [5]

## 4 Fazit

Um differenziert geeignete Betrachtungsumfänge im Produktprogramm und Betrachtungstiefen in der Produktstruktur wählen zu können, ist ein einheitliches Begriffsverständnis von großer Bedeutung.

Die Reduktion von innerer Varianz in Produktprogrammen kann durch Schritte der Modularisierung in verschiedenen Betrachtungsumfängen erfolgen. Die modulare Produktstruktur der einzelnen Produktfamilien bildet einen möglichen Ausgangspunkt zur Analyse, welche Module einer weiteren Varianzreduktion bedürfen. Für diese Module ist der geeignete Betrachtungsumfang z.B. produktfamilienintern oder –übergreifend zu wählen.

Eine weitere Modularisierung dieser Module durch Zerlegung in Komponenten auf untergeordneten Ebenen der Produktstruktur hat sich bei Jungheinrich bei mehreren Fallstudien als zweiter hilfreicher Ansatz erwiesen, um optimal die Varianten des übergeordneten Moduls konfigurieren zu können.

---

Darüber hinaus ist neben unterschiedlichen Betrachtungsumfängen und – tiefen eine Analyse der aktuellen und angestrebten Prozesse notwendig, um die modulare Struktur sowie die Modulvarianten auf die spezifischen Prozesse der Lebensphasen anzupassen.

Zusätzlich zu den genannten Beispielen Bedieneinheit und „Elektrische Anwendung Rahmen“, wurden entsprechende Vorgehensweisen bisher bei drei weiteren Modulen angewendet. Dabei bietet die Anwendung der Methoden des integrierten PKT-Ansatzes eine hilfreiche Unterstützung zur Visualisierung und Strukturierung, welche im Rahmen von Fachexperten-Workshops zielführend eingesetzt werden kann.

## Literatur

- [1] Krause, D.; Kipp, T.; Bles, C.: Modulare Produktstrukturierung. In (Steinhilper, R. Hrsg.): Handbuch Konstruktion. Hanser, München [u.a.], 2012; S. 657–678.
- [2] Eilmus, S.; Beckmann, G.; Krause, D.: Modulare Produktstrukturen methodisch in Unternehmen umsetzen - Entwicklung von Standardumfängen und Integration von Erfahrungswissen. In (Krause, D. Hrsg.): Design for X. Beiträge zum 22. DfX-Symposium, Oktober 2011; S. 99–118.
- [3] Eilmus, S.; Ripperda, S.; Krause, D.: Towards the Development of commonal Product Programs, angenommen für ICED 2013.
- [4] Bles, C.: Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. TuTech-Verl, Hamburg, 2011.
- [5] Eilmus, S.; Krause, D.: Product Life-oriented Development of Component Commonality and Variety, angenommen für ASME/IMECE 2013.



# Anwendung adaptronischer Lösungsprinzipien zur Überwindung von Zielkonflikten

David Inkermann, Thomas Vietor  
*Institut für Konstruktionstechnik*  
*Technische Universität Braunschweig*

## 1 Zusammenfassung

Adaptronische Lösungen beruhen auf der Verwendung multifunktionaler Werkstoffe. Die aktorische Funktion der Werkstoffe ermöglicht eine aktive Anpassung einzelner Produkteigenschaften und trägt damit zur Verbesserung des Produktverhaltens bei veränderlichen Nutzungs- und Umweltbedingungen bei. Die Forderung nach einem hohen räumlichen Integrationsgrades erfordert eine frühzeitige Bewertung des Einsatzpotentials adaptronischer Lösungen während der Entwicklung. Voraussetzung für diese Bewertung sind geeignete Kriterien sowie erste Hinweise für die Umsetzung der adaptronischen Lösungen. In diesem Beitrag werden Zielkonflikte für den zielgerichteten Einsatz adaptronischer Lösungen vorgeschlagen. Es wird ein Ansatz für die Identifikation und die Analyse von Zielkonflikten vorgestellt und das erforderliche Wissen zur Umsetzung der Lösungen in Form von Lösungsprinzipien bereitgestellt. Die Ableitung der adaptronischen Lösungsprinzipien erfolgt auf der Grundlage des Wirkflächen-Wirkraum-Modells [1] durch die Betrachtung der Eigenschaftsänderung von Wirkflächen, Wirkflächenpaaren und Wirkkörpern als Funktionsträger innerhalb des Systems. Ergebnis der Analyse adaptronischer Lösungen aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen sind 22 Prinzipien. Die Unterteilung in Basis- und Erweiterungsprinzipien vereinfacht den Zugriff auf das Lösungswissen und gewährleistet zeitgleich eine gute Übertragbarkeit der aufgezeigten Lösungsprinzipien.

## 2 Einleitung

Vielseitige und während der Produktnutzung veränderliche Anforderungen erfordern zunehmend anpassungsfähige Produkte. Wie im Folgenden dargestellt wird, kann diese Anpassung auf unterschiedliche Weise erfolgen. Der Einsatz multifunktionaler Werkstoffe ermöglicht die Entwicklung adaptiver Systeme, ohne Gewicht und Bauraum deutlich zu erhöhen [2].

### 2.1 Anpassungsfähigkeit von Systemen

In der Literatur werden unterschiedliche Ansätze für den Umgang mit veränderlichen Nutzungsanforderungen und Betriebsbedingungen beschrieben [3, 4]. Die beschriebenen Ansätze unterscheiden sich in der Art der betrachteten Veränderung, der Phase innerhalb des Produktlebenszyklus, in welcher die Veränderung berücksichtigt wird [5] und der Art und Weise, wie auf Veränderung reagiert wird [3]. Auf Grundlage der Vorhersehbarkeit von Änderungen unterscheiden Olewnik et al. [6] zwischen Robustheit und Anpassungsfähigkeit als Eigenschaften eines Systems, siehe Bild 1. Robuste Systeme ertragen unvorhergesehene Änderungen, während anpassungsfähige Systeme ausschließlich auf vorhersehbare Änderungen reagieren. Ziel bei der Entwicklung robuster Systeme ist es, den Effekt von Änderungen auf die Leistung des Systems zu minimieren, ohne einzelne Systemparameter anpassen zu müssen. Die Anpassungsfähigkeit eines Systems ermöglicht hingegen eine Leistungssteigerung durch Änderung von Systemparametern. Dabei kann zwischen passiver und aktiver Anpassung unterschieden werden. Aktive Anpassungen sind die Grundlage für flexible Systeme und werden während des Systembetriebes ausgeführt. Passive Anpassungen erfolgen außerhalb des Betriebes und stellen die Grundlage für modulare Systeme dar.

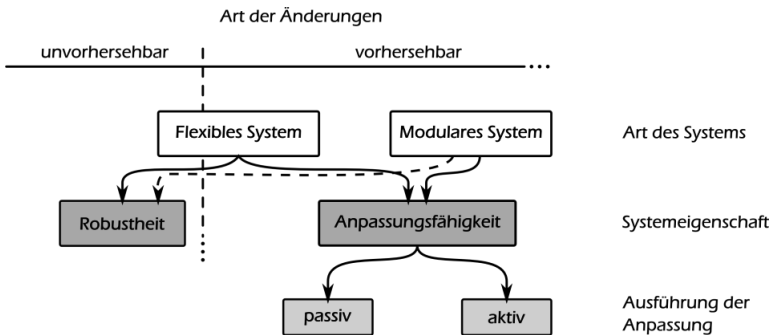


Bild 1: Unterscheidung flexibler und modularer Systeme anhand der Art der Änderungen sowie übergeordneter Systemeigenschaften, in Anlehnung an [6]

---

In diesem Beitrag wird ausschließlich die aktive Anpassungsfähigkeit eines Systems während des Betriebes betrachtet. Weiterhin werden ausschließlich vorhersehbare Änderungen während der Produktnutzung betrachtet.

## 2.2 Adaptronik

Der Begriff Adaptronik ist aus der Kombination der Wörter *adaptive* Struktur und *Elektronik* abgeleitet. Zielsetzung adaptronischer Systeme ist die Anpassung mechanischer Strukturen an veränderte Lastbedingungen, die Reduzierung von Störeffekten und die Erfüllung veränderter funktionaler Anforderungen, um die Leistungsfähigkeit technischer Systeme zu verbessern [7]. Die Anpassung erfolgt auf Grundlage der durch Sensoren erfassten Informationen über das System sowie dessen Umwelt. Mithilfe von Aktoren wird die, von der Regelungsstrategie vorgegebene Anpassung durch Einwirkung auf die mechanische Struktur ausgeführt. Die Grundstruktur adaptronischer Systeme ist somit vergleichbar mit der mechatronischer Systeme [8]. Zur Unterscheidung adaptronischer und mechatronischer Lösungen werden in der Literatur zwei wesentliche Merkmale angeführt. Demnach umfassen adaptronische Lösungen immer aktive Materialien, die aktorische, sensorische und lasttragende Funktionen erfüllen können [7]. Diese Materialien werden auch als multifunktional bezeichnet [2]. Außerdem werden bei der Entwicklung mechatronischer Systeme vorwiegend Starrkörperbewegungen berücksichtigt, während adaptronische Lösungen auf die elastische Deformation der mechanischen Struktur abzielen [9].

Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte wurden adaptronische Lösungen bereits in unterschiedlichen Bereichen wie dem Werkzeugmaschinenbau [10], dem Automobilbau [2] oder der Luft- und Raumfahrttechnik [11] entwickelt und evaluiert. Unabhängig von diesen Anwendungen besteht weiterhin Forschungsbedarf, um z.B. die Kosten der eingesetzten Aktoren zu reduzieren. Nach Pahl et al. [7] sind insbesondere Arbeiten erforderlich, um den Aufwand für die Entwicklung der Baustuktur adaptronischer Systeme zu reduzieren und die Leistung der multifunktionalen Werkstoffe (Kraft und Stellweg) zu steigern. Während der zweite Punkt vorwiegend Arbeiten in den Materialwissenschaften voraussetzt, wird im vorliegenden Beitrag ein Ansatz zur Entwicklung der Baustuktur adaptronischer Systeme vorgestellt.

## 3 Zielkonflikte bei der Synthese technischer Produkte

Während der Synthese technischer Produkte werden ausgehend von den geforderten Produkteigenschaften Merkmale und deren Ausprägungen festgelegt. Diese Festlegung setzt die Auswahl von Wirkprinzipien voraus und er-

folgt unter Berücksichtigung physikalischer, technologischer, wirtschaftlicher und logischer Restriktionen. Verschiedenartige Relationen, wie physikalische Gesetze oder geometrische Randbedingungen, schränken die Festlegung der Merkmale und ihrer Ausprägungen ein und führen oftmals zur Nichterfüllung geforderter Eigenschaften [6]. Unterliegen die geforderten Produkteigenschaften und/oder externen Bedingungen zusätzlich zeitlichen Änderungen z.B. durch Wechsel des Einsatzortes oder veränderter Nutzeranforderungen, wird die Festlegung zusätzlich erschwert. Konfliktäre Relationen zwischen einzelnen Produktmerkmalen die zu einer Nichterreichung der geforderten Produkteigenschaften führen, werden nachfolgend als *Zielkonflikte* bezeichnet. Diese Konflikte werden wie beschrieben durch gegensätzliche Optimierungsziele oder zeitliche Veränderung von Produkteigenschaften hervorgerufen und entstehen zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Entwicklungsprozesses. Um Zielkonflikte identifizieren und Maßnahmen zu deren Überwindung ableiten zu können, müssen auf Grundlage des vorliegenden Produktmodells Relationen innerhalb des Produktes sowie Wechselwirkungen mit der Produktumgebung analysiert werden. Für die Analyse von Zielkonflikten als Ausgangspunkt für die Anwendung adaptronischer Lösungsprinzipien wurden aus der Literatur [12, 13, 14] drei Umstände abgeleitet: lokaler, temporaler und konditionaler Umstand der Konfliktentstehung, siehe Bild 2.

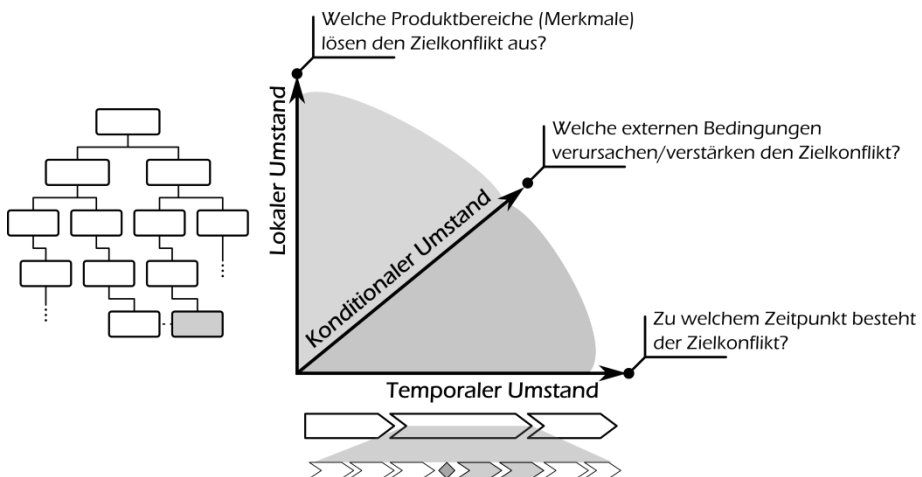


Bild 2: Umstände der Zielkonfliktentstehung und Leitfragen zur Beurteilung

Die in Bild 2 angegebenen Umstände der Konfliktentstehung werden nachfolgend beschrieben, um ausgehend hiervon die Anwendung adaptronischer Lösungsprinzipien aufzuzeigen.



---

**Temporaler Umstand.** Dieser Umstand beschreibt das Auftreten eines Zielkonfliktes mit Bezug auf das Produktverhalten und zeigt dessen Zeitabhängigkeit auf. Ist der Konflikt zeitabhängig, muss dieser nicht zu jedem Zeitpunkt der Produktnutzung bestehen. Beispielsweise wirkt sich die durch die Forderung nach hoher Steifigkeit in herkömmlichen Lagern entstehende hohe Reibung in den passiven Gelenken einer parallelkinematischen Roboterstruktur nur während der Beschleunigungs- und Bewegungsphasen negativ aus. Während des Abbremsvorganges ist eine hohe Reibung hingegen vorteilhaft. Aus der Analyse des zeitlichen Umstandes des Zielkonfliktes lassen sich Anpassungsstrategien zu dessen Überwindung oder Minderung durch die zeitliche Änderung einzelner Produktmerkmale und -eigenschaften ableiten. Damit stellt der temporale Umstand ein wesentliches Kriterium für die Anwendung adaptiver Lösungen dar.

**Lokaler Umstand.** Dieser Umstand beschreibt den Ort der Konfliktentstehung mit Bezug zu der Produktstruktur. Der Konflikt kann einzelnen Systemelementen (Einzelteiflächen, Einzelteilen oder Baugruppen) eindeutig zugeordnet werden oder wird durch eine Vielzahl von Systemelementen hervorgerufen (globaler Zielkonflikt). Beispielsweise sind für den Zielkonflikt zwischen hoher Bewegungsdynamik (hohe Beschleunigung) und hoher Positioniergenauigkeit (hohe Steifigkeit) aufgrund der Massenaddition alle bewegten Komponenten innerhalb des Kraftpfades zwischen Roboterbasis und Endeffektor ursächlich. Im Fall eines globalen Zielkonfliktes kann durch Bewertung des Beitrages (z.B. Anteil an der Gesamtsteifigkeit) der einzelnen Systemelemente ein Entwicklungsschwerpunkt gelegt werden. Um die Anwendung der eingeführten adaptiven Lösungsprinzipien zu erleichtern, muss der Zielkonflikt einzelnen Wirkflächen, Wirkflächenpaaren oder Wirkkörpern innerhalb des Systems zugeordnet werden.

**Konditionaler Umstand.** Dieser Umstand berücksichtigt die System- und Umweltbedingungen der Konfliktentstehung. Diese physikalischen oder technologischen Bedingungen können im direkten Zusammenhang mit dem temporalen Umstand stehen, z.B. aufgrund der betrachteten Lebenslaufphase, oder hiervon unabhängig sein. Für die Beschreibung des Zielkonfliktes kann der Einfluss der Bedingungen in der Regel als *wenn-dann*-Beziehung angegeben werden. Beispielsweise ist der Zielkonflikt zwischen hoher Bewegungsdynamik und hoher Positioniergenauigkeit eines Parallelroboters nur ausschlaggebend, wenn die Taktzeit einer Montagelinie aufgrund der zu geringen Dynamik überschritten wird.

Der Zeitpunkt der Konflikterkennung sowie die Anzahl der identifizierten Zielkonflikte werden maßgeblich durch das zugrunde liegende Produktmodell

---

(Anforderungsmodell, Wirkmodell, Baumodell) sowie die Erfahrung des Produktentwicklers beeinflusst. So müssen neben vorwiegend funktionalen Forderungen auf der Ebene des Wirkmodells bei der Festlegung der Baustruktur zusätzlich Fertigungs- und Montageeigenschaften sowie Betriebseigenschaften berücksichtigt werden. Dadurch können z.B. technologische oder wirtschaftliche Zielkonflikte entstehen. Aufgrund von Erfahrungen vorhergegangener Entwicklungen können bei Anpassungs- und Variantenkonstruktionen Zielkonflikte bereits im Rahmen der Aufgabenklärungsphase erkannt werden [13].

Die eingeführten Umstände der Entstehung von Zielkonflikten dienen als Grundlage für die im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen adaptronischen Lösungsprinzipien. Die Anwendung dieser Prinzipien führt zu einem adaptiven Systemverhalten, wodurch eine Überwindung von Zielkonflikten bzw. eine Minderung der Auswirkungen der Konflikte erzielt wird.

#### 4 Adaptronische Lösungsprinzipien

Als adaptronische Lösungsprinzipien werden im Folgenden Prinzipien bezeichnet, die auf der Verwendung multifunktionaler Werkstoffe basieren und zu einem adaptiven Systemverhalten führen. Zielsetzung der Formulierung von Prinzipien ist es allgemein anwendbares Wissen für konstruktive Problemstellungen zu definieren. Dieses Wissen kann aus Literaturquellen, praktischer Erfahrung und etablierter Entwicklungspraxis abgeleitet werden. Prinzipien können als Hilfestellungen im Entscheidungsprozess herangezogen werden, führen mögliche Lösungen an, verdeutlichen relevante Handlungsfelder für die weitere Entwicklungsarbeit und zeigen mögliche Folgen der Auswahl auf [15]. Vergleichbar mit der Erarbeitung von Leitlinien muss bei der Ableitung von Prinzipien ein geeignetes Abstraktionsniveau definiert werden. Abstrakte Formulierung und Darstellungen führen zu einer geringen Anzahl sehr allgemeingültiger Prinzipien, erschweren jedoch die praktische Anwendbarkeit. Bei höherer Konkretisierung steigt die Anzahl der Prinzipien und ihre praktische Anwendbarkeit wird verbessert. Eine zu große Anzahl erschwert jedoch Zugriff und Auswahl der Prinzipien für den Entwickler [16]. Einen Ansatz, diesen Konflikt zu umgehen, stellt die Gliederung von Prinzipien dar. Der Zugriff auf das Lösungswissen erfolgt zunächst über eine begrenzte Anzahl von Prinzipien, im Folgenden *Basisprinzipien* genannt. Nach einer ersten Auswahl wird das spezifische Wissen für die Umsetzung durch weitere Prinzipien, nachfolgend *Erweiterungsprinzipien* genannt, bereitgestellt. In den folgenden Abschnitten werden die aus der Analyse adaptronischer Lösungen abgeleiteten Basisprinzipien vorgestellt und auf die Beschreibung der Erweiterungsprinzipien eingegangen.

## 4.1 Basisprinzipien

Basisprinzipien beschreiben grundlegende Ansätze zur Anpassung von Systemeigenschaften. Durch die Zuordnung der Prinzipien zu Wirkflächen, Wirkflächenpaaren und Wirkkörpern wird eine direkte Verknüpfung mit der Produktgestaltung gewährleistet und damit der Forderung nach einem hohen räumlichen Integrationsgrad nachgekommen. In Bild 3 sind sieben aus der Analyse adaptronischer Lösungen abgeleitete Basisprinzipien dargestellt. Bei der Analyse wurden die von Ersoy [17] genannten Merkmale von Wirkflächen, Wirkflächenpaaren und Wirkkörpern zugrunde gelegt und ihre Beeinflussbarkeit durch multifunktionale Elemente analysiert. Die aufgeführten Basisprinzipien ermöglichen eine Veränderung der geometrischen, kinematischen und dynamischen Merkmale von Wirkflächen, Wirkflächenpaaren oder Wirkkörpern während des Produktbetriebes. Durch die Veränderung der Nockenkontur kann beispielsweise die Leistungscharakteristik eines Verbrennungsmotors an veränderte Fahr- oder Beladungsbedingungen angepasst werden. Eine Veränderung der Kontaktbedingungen zwischen Stößel und Führung kann genutzt werden, um die Rückbewegung des Stößels zu beeinflussen und somit Bedingungen für den Verbrennungsvorgang zu verändern.

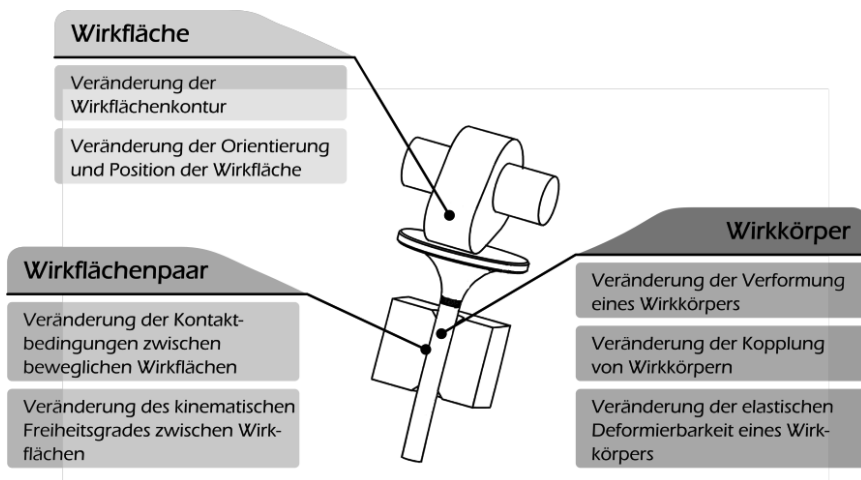


Bild 3: Aus adaptronischen Lösungen abgeleitete Basisprinzipien

Die Auswahl der Basisprinzipien erfolgt ausgehend von den für einzelne Wirkflächen, Wirkflächenpaare oder Wirkkörper identifizierten Zielkonflikten. Die abstrakte Formulierung zeigt grundsätzliche Lösungsansätze auf, die eine frühzeitige Beurteilung der prinzipiellen Umsetzung ermöglichen.

## 4.2 Erweiterungsprinzipien

Die Erweiterungsprinzipien konkretisieren die zuvor beschriebenen Basisprinzipien durch eine Lösungsbeschreibung sowie Beispiele zurückliegender Lösungen, siehe Tabelle 1 auf nachfolgender Seite. Aus bestehenden Ansätzen zur Aufbereitung prinzipieller Lösungen für mechanische [18] und mechatronische [19] Systeme wurden fünf Aspekte für die Beschreibung der Erweiterungsprinzipien abgeleitet. Die Beschreibung der Erweiterungsprinzipien besteht aus sechs Aspekten, siehe Bild 4. Während durch den physikalischen Effekt die Erfüllung des Basisprinzips in Form eines Funktionsblockes mit Eingangs- und Ausgangsgrößen beschrieben wird, wird durch die Wirkstruktur die Integration des multifunktionalen Elementes sowie die Wirkbewegung festgelegt. Diese Darstellungen werden durch eine verbale Beschreibung des Prinzips ergänzt. Ausgehend von dem Wirkprinzip zeigt die Auslegungsgrundlage relevante Geometrie- und Materialparameter auf, die im unmittelbaren Zusammenhang mit Arbeitscharakteristik des integrierten multifunktionalen Elementes stehen. Diese Angaben sollen die Festlegung der Bauteilgestalt vereinfachen. Ergänzend werden Beispiele erfolgreicher Anwendungen angegeben, um den Entwickler bei der Übertragung des Prinzips auf die vorliegende Aufgabenstellung zu unterstützen. Um die Anpassung des Lösungsprinzips an die vorliegende Aufgabenstellung zu erleichtern, werden mögliche Variationsoperationen angegeben. In Bild 4 sind die zur Beschreibung der Erweiterungsprinzipien genutzten Aspekte am Beispiel eines aktiven Stabes einer parallelkinematischen Roboterstruktur dargestellt.

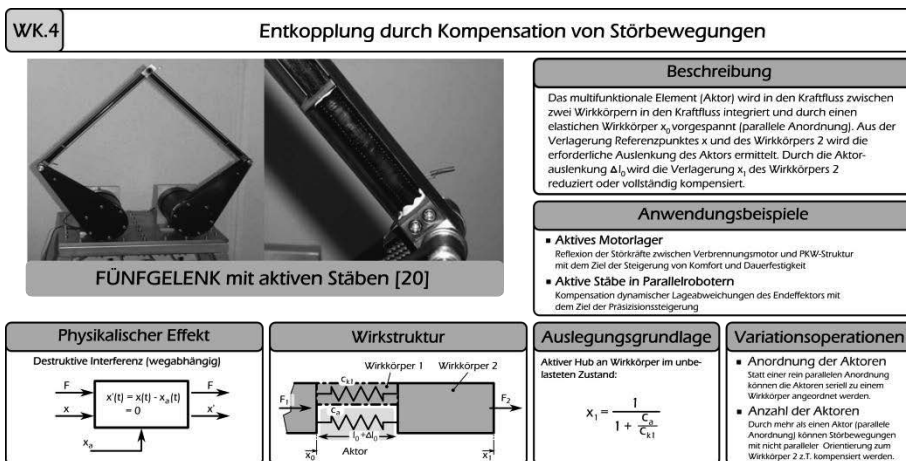


Bild 4: Exemplarische Beschreibung der Erweiterungsprinzipien am Beispiel aktiver Stäbe einer parallelkinematischen Roboterstruktur

In Tabelle 1 sind die abgeleiteten Erweiterungsprinzipien mit der Angabe eines Anwendungsbeispiels zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Basis- und Erweiterungsprinzipien adaptronischer Lösungen

	<b>Basis- / Erweiterungsprinzip</b>	<b>Anwendungsbeispiel</b>	
<b>Wirkläche</b>	Verändern der Wirkflächenkontur		
	WF 1	Elastische Deformation durch flächige Krafteinleitung	Parabolspiegel für Welt- raumanwendungen [9]
	WF 2	Elastische Deformation durch punktuelle Krafteinleitung	Parabolspiegel für Welt- raumanwendungen [9]
	Verändern der Orientierung und Position der Wirkfläche		
	WF 3	Positionsabhängige Verlagerung	Formänderung von Tragflä- chenprofilen [21]
	WF 4	Kraftabhängige Verlagerung	Formänderung von Tragflä- chenprofilen [21]
<b>Wirklächenpaar</b>	Verändern der Kontaktbedingungen zwischen beweglichen Wirkflächen		
	WFP 1	Variation der Normalkraft	Adaptive Schraubverbindung [10]
	WFP 2	Überlagerung hochfrequenter Schwin- gungen	Linearführungssysteme [10]
	Verändern des kinematischen Freiheitsgrades zwischen Wirkflächen (rotatorisch & translatorisch)		
	WFP 3	Reibschlüssige Sperrung eines Freiheits- grades	Adaptive Gelenke [22]
WFP 4	Formschlüssige Sperrung eines Freiheits- grades	Formschlüssige Kupplung [2]	
<b>Wirkkörper</b>	Verändern der Verformung eines Wirkkörpers		
	WK 1	Verlagerungskompensation durch paralle- le Krafteinleitung	Adaptronischer Spindelkopf [10]
	WK 2	Verlagerungskompensation durch serielle Krafteinleitung	Adaptronische Streben in Werkzeugmaschinen [10]
	WK 3	Verlagerungskompensation durch integ- rale Krafteinleitung	Adaptives Fahrzeugdach [2]
	Veränderung der Kopplung von Wirkkörpern		
	WK 4	Entkopplung durch Kompensation von Störbewegungen	Aktive Stäbe in Parallelrobo- tern [10]
	WK 5	Entkopplung durch Kompensation von Störkräften	Aktive Motorlager [2]
	Veränderung der elastischen Deformierbarkeit eines Wirkkörpers		
WK 6	Reduzierung der Spannung durch materialinhärente Veränderungen	Hochelastische Festkörperge- lenke [23]	
WK 7	Aufteilung des Körpers in Teilkörper und Anwendung der Prinzipien WFP1 – WFP4	Blattfeder mit variabler Stei- figkeit [24]	

---

## 5 Diskussion und Ausblick

Ziel dieses Beitrages ist es, Anhaltspunkte für einen zielgerichteten Einsatz adaptronischer Lösungen als Grundlage für die Entwicklung adaptiver Systeme zu geben sowie das hierfür erforderliche Wissen bereitzustellen. Die vorgestellte Arbeit kann in die präskriptive Phase der von Blessing und Chakrabarti beschriebenen Design Research Methodology (DRM) [25] eingeordnet werden. Der vorgestellte Ansatz adressiert ausschließlich die Entwicklung der Baustuktur adaptronischer Systeme und adressiert bisher nicht die interdisziplinäre Zusammenarbeit bei der weiteren Entwicklung. Die Klassifizierung der eingeführten Prinzipien anhand von Wirkflächen, Wirkflächenpaaren und Wirkkörpern berücksichtigt jedoch in besonderer Weise die direkten Wechselwirkungen zwischen passiven und aktiven Strukturelementen in adaptronischen Systemen. Gleichzeitig stellt diese Gliederung einen neuen Ansatz für eine Bewertung des Einsatzpotentials der eingeführten Prinzipien in frühen Entwicklungsphasen dar.

Aufgrund des präskriptiven Forschungsansatzes kann von einer guten praktischen Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Prinzipien ausgegangen werden. Die beabsichtigte Anwendung des beschriebenen Ansatzes wurde in vorherigen Arbeiten bereits durch Anwendungsbeispiele verdeutlicht [26]. Um die Anwendbarkeit und den Erfolg der Hilfsmittel abschließend beurteilen zu können, soll in zukünftigen Arbeiten eine Evaluation unter Einbeziehung verschiedener Produktentwickler erfolgen. Durch diese Evaluation soll die Zweckmäßigkeit der Gliederung der Prinzipien sowie ihre Vollständigkeit und die Nachvollziehbarkeit der bereitgestellten Informationen überprüft werden.

### Literatur

- [1] Roth, K.: "Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 1 Konstruktionslehre", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1994.
- [2] Janocha, H. (Hrsg.): "Adaptronics and Smart Structures", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [3] Schmitt, J.; Inkermann, D.; Stechert, C.; Raatz, A.; Vietor, T.: "Requirement oriented reconfiguration of parallel robotic systems". In: Dutta, A. (Hrsg.): "Robotic Systems - Applications, Control and Programming". InTech, Seiten 387 – 410, 2012.
- [4] Bischof, A.: "Developing flexible products for changing environments". Dissertation, Technische Universität Berlin, 2010

- 
- [5] Chmarra, M.; Arts, L.; Tomiyama, T.: "Towards adaptable architecture". In: ASME Conference Proc. (DETC2008-49971), 2008.
- [6] Olewnik, A.; Brauen, T.; Ferguson, S.; Lewis, K.: "A framework for flexible systems and its implementation in multiattribute decision making". In: Journal of Mechanical Design, 126(3) Seiten 412 – 419, 2004.
- [7] Pahl, G; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [8] Verein Deutscher Ingenieure: "Richtlinie VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme". Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [9] Melz, T.: "Entwicklung und Qualifikation modularer Satellitensysteme zur adaptiven Vibrationskompensation an mechanischen Kyrorkühlern". Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001.
- [10] Hesselbach, J. (Hrsg.): "Adaptronik für Werkzeugmaschinen – Forschung in Deutschland". Shaker Verlag, Aachen, 2011.
- [11] Venneri, S.; Wada, B.: "Overview of the nasa's adaptive structures program". In: 44th Congress of the Int. Astronautical Fed. (IAF-93-I.5-243), 1993.
- [12] Altshuller, G.: "Creativity as an exact science. Gordon & Braech", New York, 1984.
- [13] Stechert, C.: "Modellierung komplexer Anforderungen". Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2010.
- [14] Eiletz, R.: "Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Bsp. PKW-Entwicklung". Dissertation, Technische Universität München, 1999.
- [15] Charlton, C.; Nowack, M.; Wallace, K.: "Engineering design guideline support scheme". In: 11th International Conference on Engineering Design (ICED'97), Seiten 657–660, 1997.
- [16] Wie, M. V.: "Designing product architecture: A systematic method". PhD Thesis, University of Texas at Austin, USA, 2002.

- 
- [17] Ersoy, M.: "Wirkfläche und Wirkraum – Ausgangselemente zum Ermitteln der Gestalt beim rechnerunterstützten Konstruieren". Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1975.
- [18] Koller, R.; Kastrup, N.: "Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1994.
- [19] Gausemeier, J.; Frank, U.; Donoth, J.; Kahl, S.: "Specification Technique for the Description of Selfoptimizing Mechatronic Systems". In: Research in Engineering Design, 20(4), Seiten 201 – 223, 2009.
- [20] Keimer, R.; Rose, M.; Allgermisen, S.: "Parallelroboter mit adaptronischer Schwingungsunterdrückung am Beispiel der Versuchsstruktur FÜNFGELENK". In: Adaptronic Congress 2003, Wolfsburg, 2003.
- [21] Sofla, A.Y.N.; Meguid, S.A.; Tan, K.T.; Yeo, W.K.: "Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges". In. Materials & Design, 31(3), Seiten 1284-1292, 2012.
- [22] Pavlovic, N.; Otremba, R.; Inkermann, D.; Franke, H.; Vietor, T.: "Passive and adaptive joints for parallel robots". In: Wahl, F.; Schuetz, D. (Hrsg.): "Robotic Systems for Handling and Assembly". Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Seiten 429 – 444, 2010.
- [23] Raatz, A.: "Stoffschlüssige Gelenke aus pseudo-elastischen Formgedächtnislegierungen in Parallelrobotern". Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2006.
- [24] Kawamura, S.; Yamamoto, T.; Ishida, D.; Ogata, T.; Nakayama, Y.; Tabata, O.; Sugiyama, S.: "Development of passive elements with variable mechanical impedance for wearable robots". In: Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA'02), Seiten 248–253, 2002.
- [25] Blessing, L.; Chakrabarti, A.: "DRM, a Design Research Methodology". Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2009.
- [26] Inkermann, D.; Stechert, C.; Vietor, T.: "Einsatz multifunktionaler Werkstoffe für die Entwicklung einer adaptiven Gelenkachse". In: 8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, Seiten 231-244, 2011.

# Die Auswirkung der Reihenfolge von Mess- und Simulationsdaten auf das Ergebnis der Kreuzvalidierung in KDD Prozessen

Christof Küstner, Thilo Breitsprecher, Sandro Wartzack  
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Universität Erlangen Nürnberg*

## 1 Einleitung

Die Wissensentdeckung in Datenbanken (engl. Knowledge Discovery in Databases; KDD) stellt einen rechnerunterstützten Prozess dar, Wissen aus komplexen Daten zu extrahieren [2]. Durch den verstärkten Einsatz rechnerunterstützter Methoden und Werkzeuge (z. B. FEM, MKS, CFD, usw.) in frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses (PEP), steigt das Volumen an entwicklungsrelevanten Daten im PEP stetig an. Sowohl Messdaten als auch Simulationsergebnisse enthalten konstruktionsrelevantes Wissen, auf das der Produktentwickler ohne Rechnerunterstützung nicht in vollem Umfang zugreifen kann. Hierdurch bleibt in der Entwicklung ein Potential unangetastet, das eigentlich beinahe kostenneutral zur Verfügung steht. In einer Zeit, in der Wissen zu einer der wichtigsten Produktionsfaktoren zählt, kann dieses nicht ausgeschöpfte Potential zu einem Wettbewerbsnachteil führen [5].

Die KDD Methodik kann u. a. dazu eingesetzt werden, den Informationsgewinn von Simulationen bzw. Simulationsstudien für komplexe Produkte zu erhöhen. Ebenso kann durch den gezielten Einsatz die Anzahl von Simulationssiterationen reduziert werden. Kellermeyer, Walter und Breitsprecher zeigen diesen Effekt erfolgreich [1,3,7]. Sie erzeugen mittels des KDD Prozesses Vorhersagemodelle, um mit diesem entwicklungsrelevanten Wissen das Produktverhalten abzuschätzen. Zur Erzeugung der Vorhersagemodelle setzt KDD im Kern maschinelles Lernen ein. Hierbei ist die Kenntnis der Performanz des Vorhersagemodells ein wichtiges Qualitätsmerkmal, da dieses sehr anschau-

lich als „Wissensgüte“ verglichen werden kann. Die Performanz definiert die Vorhersagegüte bzw. –genauigkeit des Vorhersagemodells und bildet dadurch z. B. die Basis des Vergleichs von verschiedenen Vorhersagemodellen. Die Performanz muss aus diesem Grund dem Anspruch der Robustheit gerecht werden um als Vergleichsbasis zu dienen, d. h. die Performanz muss eine von allen Einflussgrößen unabhängige Größe darstellen.

Diese Vorgehensweise findet auch im intereuropäischen Verbundprojekt EUREKA-ALARM, bestehend aus REpower, Novicos, ESM, ZF Wind Power, LMS, KU Leuven und KTMfk, eine Anwendung. ALARM ist ein Akronym und steht für Assistenzsystem für die lärmreduzierte Auslegung rotierender Maschinen. Am Beispiel einer modernen Windenergieanlage soll der Entwicklungsingenieur durch kontextsensitive Wissensbereitstellung von entwicklungsrelevantem Wissen unterstützt werden, so dass das Optimierungspotential im Hinblick auf das akustische Verhalten schon in frühen Phasen des PEP erkannt wird (siehe Bild 1) [4].

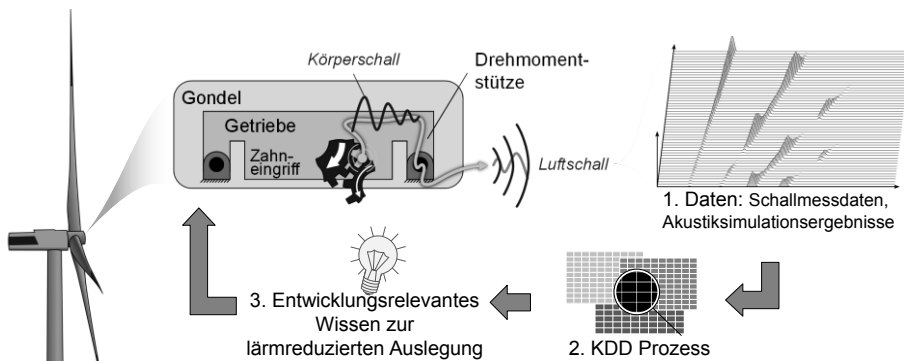


Bild 1: Wissensakquisitionsszenario im Projekt EUREKA-ALARM

Das entwicklungsrelevante Wissen wird im Projekt EUREKA-ALARM durch KDD aus Schallmessungen und Akustiksimulationsergebnissen erhoben. Hierbei werden u. a. Produktmerkmale moderner Windenergieanlagen deren Schallemission gegenüber gestellt. Die vorgestellte Problemstellung ist im Verlauf des Projektes EUREKA-ALARM bei der Wissensakquisition mit dem KDD Werkzeug RapidMiner<sup>®</sup> aus Schallemissionsmessungen und Simulationsergebnissen aufgetreten. Es zeigte sich, dass diese Problemstellung ein grundlegendes Problem von KDD Prozessen zur Wissensakquisition ist.



## 2 Grundlagen

Bevor auf die Problemstellung näher eingegangen wird, werden wichtige Grundlagen, die zum Verständnis der Problematik beitragen, erläutert.

### 2.1 Der KDD Prozess

Ein Teilschritt im KDD Prozess bedarf der Verwendung von Data Mining Methoden. Nach Fayyad ist Data Mining die Anwendung von speziellen Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens, um Muster oder Zusammenhänge in Daten, z. B. aus Akustiksimulationen oder experimentellen Messungen von modernen Windenergieanlagen, aufzudecken [2]. Hierbei können *Beschreibungsprobleme* (Clusteranalysen) oder *Prognoseprobleme* (Klassifikation oder Regression) vorliegen. Beschreibungsprobleme teilen die vorliegenden Eingangsdaten so in Gruppen (Cluster) ein, dass die Datentupel eines Clusters möglichst ähnlich sind. Bei Prognoseproblemen wird basierend auf einem Eingangsdatensatz, bestehend aus  $m$  Simulationen oder experimentellen Beobachtungen (Datentupel), ein Vorhersagemodell für neue, nicht im Eingangsdatensatz enthaltene Tupel aus Attributen und Zielgrößen erstellt (siehe Bild 2). Die Problemstellung ist somit induktiver Natur. Das Vorhersagemodell ist in jedem Fall nur eine bestmögliche Annäherung an das wirkliche Systemverhalten und verlangt die Angabe einer Performanz (Vorhersagegüte), wie gut die Zielgröße durch das Vorhersagemodell abgebildet ist. Das Vorhersagemodell kann in Form von Regressionsgleichungen, Modellbäumen, künstlichen neuronalen Netzen, Regeln oder Mischformen (z. B. Regressionsbäume) abgespeichert sein [8].

	Attribut 1	Attribut 2	Attribut 3	...	Zielgröße 1	...
<i>Datentupel 1:</i>	5	3,2	4	...	2,3	...
<i>Datentupel 2:</i>	8	5,6	2	...	6,5	...
...	...	...	...	...	...	...
<i>Datentupel m:</i>	1	6,67	150	...	10,8	...
	4	10	2	...	?	?

} Prognose

Bild 2: Darstellung eines Eingangsdatensatzes und eines Prognoseproblems

---

## 2.2 Validation der Vorhersagemodelle

Die Performanz eines Vorhersagemodells beschreibt die Vorhersagegüte bzw. -genauigkeit des Vorhersagemodells. Die Performanz eines Vorhersagemodells kann durch spezielles Testen des erzeugten bzw. trainierten Vorhersagemodells abgeschätzt werden. Hierbei wird beim Trainieren des Vorhersagemodells gezielt ein Teil der Datentupel dem Trainingsprozess vorenthalten, die im Anschluss als Testdaten verwendet werden. Nachdem das Vorhersagemodell mit den Trainingsdaten trainiert wurde, werden für jeden Testdatentupel die Attribute in das Vorhersagemodell eingesetzt und die vorhergesagten Zielgrößen mit den bekannten Zielgrößen der Testdatentupel verglichen. Die Performanz sagt aus, wie gut das Vorhersagemodell die Zielgrößen der Testdatentupel auf Basis der Trainingsdaten vorhersagen kann. Diese so ermittelte Performanz stellt eine Abschätzung der Prognosefähigkeit der betrachteten Zielgrößen für unbekannte Datentupel dar.

Ziel eines KDD Prozesses ist es ein Vorhersagemodell zu generieren, das einerseits die Eingangsdaten und andererseits zukünftige Beobachtungen gut abbildet. Prognostiziert ein Vorhersagemodell die Eingangsdaten sehr gut, zeigt jedoch bei neuen Daten bzw. Beobachtungen eine schlechte Performanz, wird dies *Overfitting* genannt (dt. Überanpassung des Vorhersagemodells auf die Eingangsdaten). Beschreibt das Vorhersagemodell die Eingangsdaten zu ungenau, wird dies *Underfitting* genannt (dt. Unteranpassung des Vorhersagemodells). Das Underfitting zeigt sich ebenfalls in einer schlechten Performanz.

Zur Vermeidung des Overfittings werden verschiedene Validationsmethoden eingesetzt [8]:

- Cross-validation (dt. Kreuzvalidierung oder  $n$ -fache Kreuzvalidierung)
- Leave-One-Out Cross-Validation (Kreuzvalidierung mit Anzahl Datentupel  $m$  gleich Anzahl der Gruppen  $n$  in der Kreuzvalidierung)
- The Bootstrap (dt. Stiefelriemen; Testdateneinteilung durch Ziehen mit Zurücklegen)

Die verbreitetste und anerkannteste Validationsmethode stellt die Kreuzvalidierung dar [6]. Die  $n$ -fache Kreuzvalidierung teilt alle Datentupel des Eingangsdatensatzes zufällig in  $n$  gleich große Gruppen. Danach verwendet die Kreuzvalidierung alle Gruppen bis auf einen für das Training ( $\frac{n-1}{n}$ ) und

die verbleibende Gruppe ( $\frac{1}{n}$ ) für die Performanzberechnung. Der Training-Test-Prozess wird  $n$ -Mal durchgeführt, wobei bei jeder Iteration sukzessive eine andere Gruppe ausgelassen und zur Berechnung der Performanz verwendet wird (engl. folds). Für  $n$  wird sehr oft ein Wert von 10 angenommen, da dieser sich als bewährter Kompromiss zwischen Rechenzeit und statistischer Genauigkeit gezeigt hat [8].

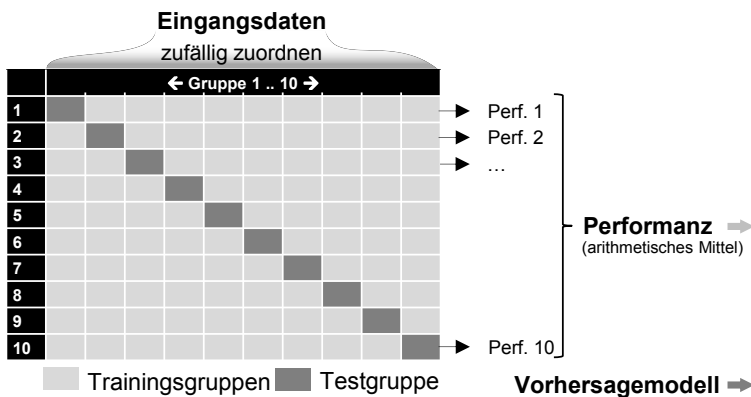


Bild 3: Die 10-fache Kreuzvalidierung

Bei  $n = 10$  möglichst gleich großen, zufällig aufgeteilten Gruppen wird in der ersten Iteration Gruppe 1 – 9 für das Training und Gruppe 10 für das Testen verwendet. In der zweiten Iteration wird Gruppe 1 – 8 und Gruppe 10 für das Training, die Gruppe 9 für das Testen verwendet, u. s. w.. Sind die 10 Iterationen durchlaufen wird aus den 10 Performanzen das arithmetische Mittel gebildet. Ein  $n + 1$  ter (hier: 11 ter) Durchlauf trainiert erneut das Vorhersagemodell, diesmal werden jedoch alle 10 Gruppen berücksichtigt, um alle Datentupel für die Modellbildung einzuschließen (siehe Bild 3). Hierdurch bleiben keine zur Verfügung stehende Informationen unberücksichtigt. Das Ergebnis einer Kreuzvalidierung ist schließlich das Vorhersagemodell, das aus allen Eingangsdaten gebildet wurde, sowie das arithmetische Mittel aus allen 10 Performanzen. Dieser Kennwert stellt einen guten Schätzer der Performanz des Vorhersagemodells für neue Daten dar.

### 2.3 Rechnererzeugte Zufallszahlen

Der Computer ist nicht in der Lage echte Zufallszahlen zu generieren. Jede Programmiersprache stellt Algorithmen zur Verfügung Zufallszahlen zu erzeugen. Der Algorithmus errechnet auf Basis eines Startwertes, dem sog.

*Randomseed* (dt. Zufallsaat) die Zufallszahl. Ist der Randomseed von zwei unabhängigen Zufallszahlenberechnungen gleich, so sind die erzeugten Zufallszahlen in Reihenfolge und Quantität identisch. Aus diesem Grund wird auch von Pseudozufallszahlen gesprochen. Um bessere Zufallszahlen zu erzeugen, muss der Randomseed stetig verändert werden, so dass nicht direkt nachvollzogen werden kann, welchen Wert der Randomseed zu Beginn der Zufallszahlberechnung hat. Die Zeit bietet sich hier als geeignete Basis zur Zufallszahlenberechnung an. Im Computer steht als Zeitmaß zum Beispiel der UNIX-Timestamp (dt. Unixzeit) zur Verfügung. Dieser repräsentiert die vergangenen Sekunden als ganze Zahl seit dem 01.01.1970 00:00 Uhr UTC (siehe Bild 4). Eine zweite Möglichkeit stellt die Uptime (dt. Betriebszeit) als Referenzzeit dar, die die vergangene Zeit seit dem letzten Reboot des Computers zählt. Wird diese Zeit als Randomseed verwendet, ändert sich die Basis vor jeder relevanten Zufallszahlenberechnung. Auf diese Weise besitzt die Zufallszahlenberechnung stets eine unterschiedliche „Ausgangsbasis“, wodurch eine schwer vorhersagbare Zufallszahl berechnet wird.

Aufruf #1: 123456	Aufruf #2: 123456	Aufruf #3: time()	Aufruf #4: time()
seed(123456)	seed(123456)	seed(time())	seed(time())
randint(1,1000): 806	randint(1,1000): 806	randint(1,1000): 143	randint(1,1000): 585
randint(1,1000): 795	randint(1,1000): 795	randint(1,1000): 336	randint(1,1000): 640
randint(1,1000): 30	randint(1,1000): 30	randint(1,1000): 730	randint(1,1000): 242
↑ identisch ↑		↑ nicht identisch ↑	

Bild 4: Auswirkungen des Randomseeds auf die Zufallszahlenberechnung

### 3 Problemstellung

Ziel des KDD Prozesses besteht u. a. darin, eine möglichst robuste Aussage über die Performanz des berechneten Vorhersagemodells zu treffen. Eine Performanz kann nur berechnet werden, wenn ein Vorhersagemodell mit Datentupel getestet wird, die zum Lernen nicht zur Verfügung standen. Aus diesem Grund wird die Kreuzvalidierung eingesetzt (siehe Kapitel 2.2). Die 10-fache Kreuzvalidierung ordnet hierbei die einzelnen Datentupel des Eingangsdatensatzes *zufällig* in zehn möglichst gleich große Gruppen. Hierbei muss der Aspekt der Zufallszahlengenerierung beachtet werden, die bei der zufälligen Zuordnung der Datentupel von Relevanz ist: Wird der Randomseed zu Beginn des Prozesses auf einen konstanten Wert festgelegt, sind alle nachfolgenden generierten Zufallszahlen stets reproduzierbar, indem der Randomseed erneut auf diesen Wert gesetzt wird (siehe Bild 4; Aufruf #1 und #2). Die so generierten Zufallszahlen sind in Quantität und Reihenfolge identisch.

Wird ein konstanter Randomseed zur zufälligen Verteilung der Datentupel in zehn gleich große Gruppen verwendet, so wird jedes Datentupel im ersten Durchlauf der Kreuzvalidierung einer echt zufälligen Gruppe zugeordnet, in den folgenden Durchläufen ist die Aufteilung jedoch bekannt und somit nicht mehr zufällig, d.h. durch jeden Neustart der Kreuzvalidierung wird der Randomseed auf den vorherigen, konstanten Wert zurückgesetzt. Die Verteilung der einzelnen Datentupel in Gruppen erfolgt in jedem Durchlauf somit nach demselben Zuordnungsschlüssel.

In Bild 5 ist ein einfacher KDD Prozess im KDD Werkzeug RapidMiner<sup>®</sup> modelliert. Zuerst werden die Daten mittels einem Datenimportoperator in den Prozess geladen und anschließend die Performanz in einem Kreuzvalidierungsoperator berechnet. Im vorliegenden Fall handelt es sich bei der Performanz um den relativen Fehler zwischen vorhergesagter und realer Zielgröße als leicht zu interpretierenden Performanzkennwert. Je kleiner der relative Fehler ist, desto besser ist die Performanz. Zudem muss im KDD Werkzeug RapidMiner<sup>®</sup> zwischen globalem und lokalem Randomseed differenziert werden. Der globale Randomseed wird von den Operatoren verwendet, in denen nicht explizit ein lokaler Randomseed gesetzt wird. Standardmäßig ist der globale Randomseed im KDD Werkzeug RapidMiner<sup>®</sup> auf den konstanten Wert 2001 gesetzt. In den Operatoren, die Zufallszahlen benötigen, ist standardmäßig kein lokaler Randomseed gesetzt, weshalb diese auf den globalen Randomseed zurückgreifen.

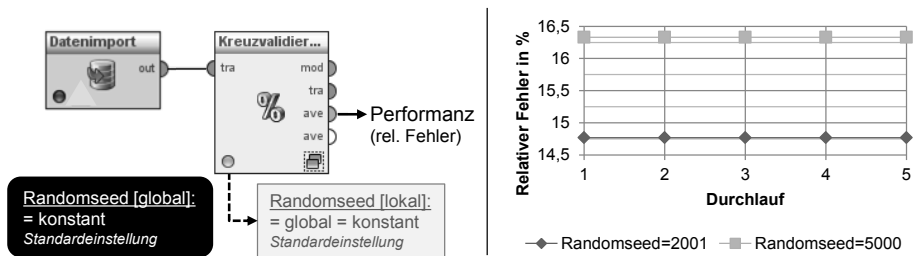


Bild 5: Ein einfacher KDD Prozess mit konstantem Randomseed

Das Bild 5 zeigt, dass nach jedem Neustart des KDD Prozesses der Performanzwert identisch zum vorherigen Durchlauf ist (Fall: „Randomseed=2001“ in Bild 5). Im ersten Moment wirkt die Performanz somit robust, denn der Performanzwert ist reproduzierbar. Wird der globale Randomseed nun verändert (Fall: „Randomseed =5000“ in Bild 5), so ist zu erkennen, dass sich die Performanz auch verändert. Die naheliegende Lösung zur Berechnung einer robusten Performanz wäre, den Randomseed global

konstant zu halten, was sich als fatal zeigt, wenn sich die Auswirkung der Veränderung des globalen Randomseeds bewusst gemacht wird: Die Veränderung des Randomseeds verändert die Verteilung der Datentupel in Test- und Trainingsgruppen. Der gleiche Effekt könnte erzielt werden, wenn die Reihenfolge der Eingangsdaten bei bekanntem Zuordnungsschlüssel verändert wird, denn auch dann würden die einzelnen Datentupel unterschiedlichen Test- und Trainingsgruppen zugeordnet. Dieser Zusammenhang erklärt die unterschiedliche Performanz, wenn sich der lokale Randomseed des Kreuzvalidierungsoperators verändert, oder wenn bei gleichem Randomseed die Reihenfolge der Eingangsdaten verändert wird. Der letztere Fall tritt z. B. in Erscheinung, wenn neue Akustiksimulationsergebnisse oder Schallmessungen den Eingangsdatensatz um ein oder mehrere Datentupel erweitern, oder diese z. B. durch Umsortieren neu angeordnet werden.

Bei der Veränderung der Eingangsdaten oder des globalen Randomseeds ist somit eine hohe Varianz der Performanz zu erwarten. Generell beschreibt die Literatur, dass eine Kreuzvalidierung statistisch abgesichert werden soll. Zur statistischen Absicherung wird eine zehnfach ausgeführte 10-fache Kreuzvalidierung mit anschließender Mittelwertbildung empfohlen [8].

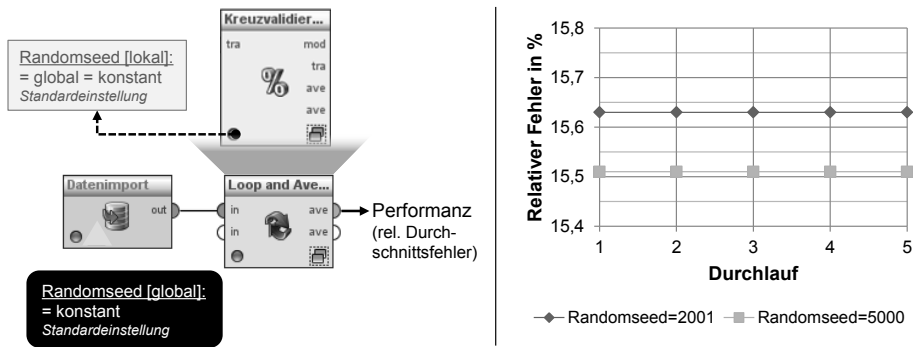


Bild 6: Zehnfache 10-fach Kreuzvalidierung mit konstantem Randomseed

In Bild 6 wird der einfache KDD Prozess aus Bild 5 um den „Loop and Average“ Operator erweitert. Dieser ermöglicht die Wiederholung (loop) aller inneren Subprozesse und die anschließende Ausgabe des arithmetischen Mittels (average) eines beliebigen im Innern erzeugten Wertes. Er garantiert somit die statistische Absicherung der Kreuzvalidierung, indem er die Kreuzvalidierung mehrfach ausführt und anschließend aus den Einzelpermanzen ein arithmetisches Mittel bildet und ausgibt.

Auch in diesem KDD Prozess ist nach jedem Neustart der Performanzwert identisch zum vorherigen Durchlauf (Fall: „Randomseed=2001“ in Bild 6). Ebenso verändert sich die Performanz, falls der globale Randomseed verändert wird (Fall: „Randomseed=5000“ in Bild 6). Es kann also davon gesprochen werden, dass die Reihenfolge der Eingangsdaten einen Einfluss auf das Ergebnis der Kreuzvalidierung in KDD Prozessen hat. Im Folgenden Kapitel wird für diese Problematik ein Lösungsansatz diskutiert.

## 4 Lösungsansatz

Möchte der spätere Anwender von Vorhersagemodellen deren Performanz vergleichen, muss er sich auf eine statistisch robuste und dadurch reproduzierbare Kreuzvalidierung verlassen. Wie im Kapitel 3 gezeigt wurde, beeinflusst die Reihenfolge von Eingangsdaten die Performanz als ein Ergebnis des KDD Prozesses jedoch nachhaltig. Für eine robuste Kreuzvalidierung muss die dabei durchgeführte Aufteilung des Eingangsdatensatzes statistisch abgesichert werden. Da der Eingangsdatensatz an sich nicht verändert werden kann und eine Durchmischung der einzelnen Datentupel vor dem KDD Prozess (außerhalb des KDD Werkzeugs) sehr ineffektiv ist, muss durch einen günstig gewählten Randomseed die benötigte statistische Sicherheit erreicht werden. Die Festlegung des Randomseed kann für einen einfachen Kreuzvalidierungsprozess innerhalb des KDD Werkzeugs RapidMiner® an verschiedenen Stellen erfolgen (siehe Kapitel 3).

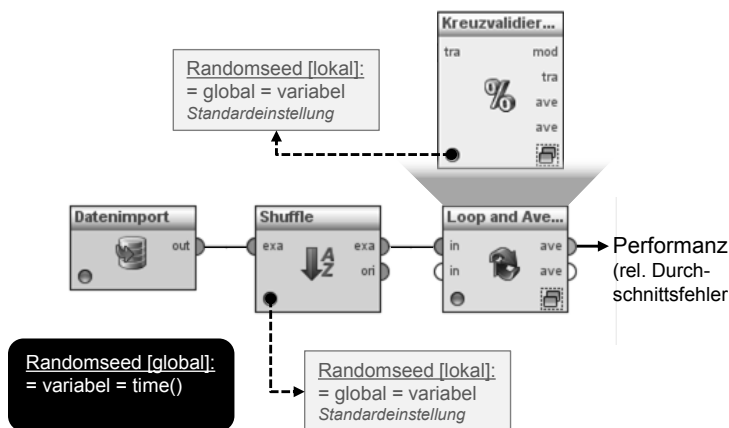


Bild 7: Um variable Randomseeds erweiterter KDD Prozess.

Die in diesem Beitrag vorgeschlagene Lösung erweitert den im Kapitel 3 gezeigten KDD Prozess durch gezielten Einsatz von variablen Randomseeds

(siehe Bild 7). Der globale Randomseed wird durch die Systemzeit bestimmt, wodurch sich bei jedem Neustart des Prozesses andere Pseudozufallszahlen ergeben. Nach dem Datenimport werden die Eingangsdaten durchmischt (Shuffle), um den Einfluss einer veränderten Datentupelreihenfolge abzubilden. Das Durchmischen greift auf den globalen Randomseed zurück und erzeugt somit bei jedem Durchlauf eine andere Anordnung der Datentupel in den Eingangsdaten. Innerhalb des „Loop and Average“ Operators wird eine 10-fache Kreuzvalidierung durchlaufen. Auch die Kreuzvalidierung greift für die Einteilung in Test- und Trainingsdaten auf den globalen Randomseed des KDD Prozesses zurück.

Zur Verdeutlichung der Wirksamkeit des Lösungsansatzes wird der gezeigte KDD Prozess mehrmals durchlaufen und vor jedem Neustart die Anzahl der zu durchlaufenden Loops auf 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 50, 100 und 1000 gesetzt (entspricht zehn Variationen). Um die statistische Auswertung anschaulicher zu gestalten wird der Prozess mit jeder Loop Einstellung 25 Mal wiederholt. Dadurch ergeben sich insgesamt 250 unterschiedliche Performanzen.

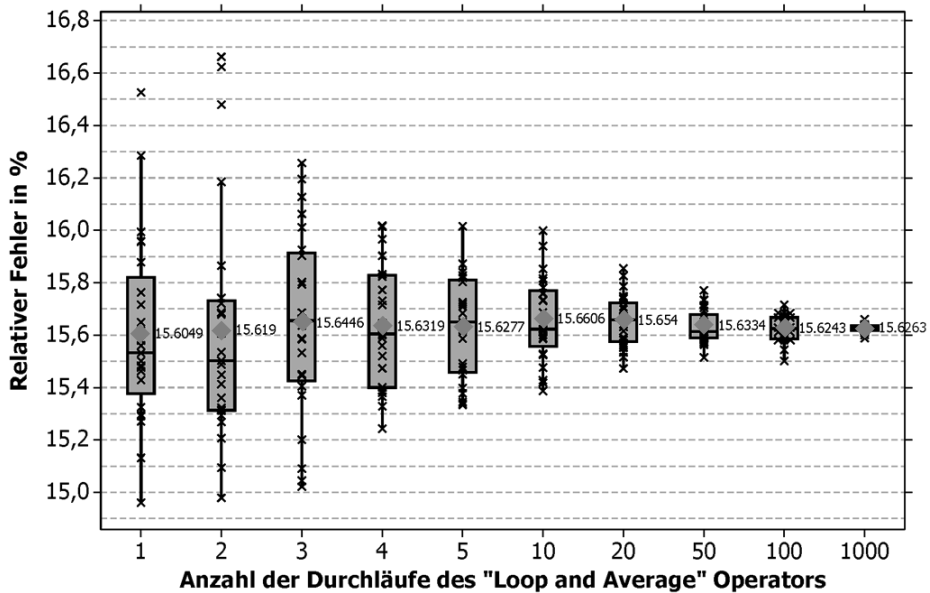


Bild 8: Boxplot der Performanzen mit steigender Anzahl von Loopedurchläufen

Für die statistische Auswertung wird auf einen sogenannten Boxplot zurückgegriffen (siehe Bild 8). Innerhalb jeder Box befinden sich die mittleren

---

50% aller Einzelwerte (Symbol  $\times$ ) jedes Durchlaufs, d. h. je 12 bis 13 Einzelwerte. Ein Querstrich innerhalb jeder Box kennzeichnet die Lage des Median. Die Mittelwerte sind durch das Symbol  $\blacklozenge$  gekennzeichnet und jeweils rechts der Box vermerkt. Für jede Anzahl an Loops liegt der Mittelwert des relativen Fehlers bei 15,6%, was aufgrund der 25-fachen Wiederholung nachvollziehbar ist. Wichtig ist hierbei jedoch anzumerken, dass sehr häufig zur Berechnung der Performanz im KDD Prozess fehlerhafterweise der Versuch mit einem Datensatz nicht so häufig wiederholt, sondern nur einmal durchgeführt wird (linke Box, 1 Loop). Dies entspricht einer einfachen 10-fach Kreuzvalidierung. Das vorliegende Beispiel zeigt, dass der relative Fehler dabei sowohl 14,9% (Minimum, unterer Whisker) als auch 16,5% (Maximum, oberer Whisker) betragen kann. Der Anwender darf also nicht von einer robusten Performanz ausgehen. Diese Streubreite reduziert sich mit steigender Anzahl an durchlaufenden Loops, bis bei einem zehnfachen Loop die Länge der Box der Hälfte der ursprünglichen Box entspricht. Bei 1000 Loops beläuft sich dieser Wert dann nur noch auf einen geringen Bruchteil von  $1/22$ . Es kann also gezeigt werden, dass der Einfluss der Reihenfolge des Eingangsdatensatzes durch geschickt eingesetzte Zufallszahlen, sowie durch eine mehrfache Wiederholung der Kreuzvalidierung minimiert und die Robustheit eines Performanzkennwertes erhöht werden kann.

## 5 Diskussion und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass durch einen richtigen Einsatz von Zufallszahlen in Kombination mit einer statistischen Absicherung, der Einfluss der Reihenfolge der Eingangsdaten auf das Ergebnis eines KDD Prozesses reduziert werden kann. Ein Kompromiss zwischen Rechenzeit und robuster Performanz zeigt sich bei einer 10 bis 20-fachen Kreuzvalidierung und anschließender Mittelwertbildung. Die robuste Performanz zu einem Vorhersagemodell ist vor allem dann notwendig, wenn verschiedene Vorhersagemodelle miteinander verglichen werden. Generell werden verschiedene Vorhersagemodelltypen trainiert (z. B. Regressionsgleichungen, künstliche neuronale Netze, u. s. w.) und das passende Vorhersagemodell anhand der Performanz ausgewählt. Dies ist notwendig, da nicht jedes Vorhersagemodell zu jedem wirklichen Systemverhalten passt, z. B. ist ggf. für Schallmessungen ein anderer Vorhersagemodelltyp als für Akustiksimulationsergebnisse notwendig. Wesentlich wichtiger ist die robuste Performanz bei Optimierungsprozessen, die zur Reduzierung des Underfittings eingesetzt werden. Treten hierbei in einem Optimierungsschritt zwei Varianten eines Vorhersagemodells mit ihren Performanzen gegeneinander an, so kann eine hohe Varianz einer Performanz dazu führen, dass die eigentlich bessere Vorhersagemodellvariante nicht mehr berücksichtigt wird.

---

## Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Literatur

- [1] Breitsprecher, T. et al.: "Acquisition of heuristic knowledge for the prediction of the frictional behavior of surface structures created by self-excited tool vibrations", *Key Engineering Materials*, Vol. 504–506, S. 963–968, 2012.
- [2] Fayyad, U. et al.: "From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases", *AI Magazine*, Vol. 17, S. 37–54, 1996.
- [3] Kellermeyer, M. et al.: "Numerische Untersuchung der Einflüsse von Streuungen auf Versagenskriterien von Composite Strukturen", In: 23. DfX-Symposium 2012, 2012.
- [4] Küstner, C. et al.: "Design for noise reduction – The architecture of an engineering assistance system for the development of noise-reduced rotating systems", In: ICED 13 – 19<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design, Seoul, 2013.
- [5] Mohr, H.: "Wissensnetze heute", In: Beyrer, K. et al. (Hrsg.): *Das Netz. Sinn und Sinnlichkeit vernetzter Systeme*, Heidelberg: Braus, S. 125–129, 2002.
- [6] Prekopcsák, Z. et al.: "Cross-validation: the illusion of reliable performance estimation", In: RCOMM RapidMiner Community Meeting and Conference, 2010.
- [7] Walter, M. et al.: "Tolerance analysis of mechanism taking into account the interactions between deviations using meta-models", In *Proceedings of 9th Norddesign Conference 2012*, Aalborg, 2012.
- [8] Witten, I. H. et al.: "Data mining: Practical machine learning tools and techniques", 3. Auflage, Burlington: Morgan Kaufmann, 2011.

## Realisierung komplexer Versuchsaufbauten in Hochdrucktestumgebungen

Karen Malone, Ralf Seemann, Dieter Krause  
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Technische Universität Hamburg-Harburg*

Due to the shortage of fossil fuels and the contemporaneous growth of the worldwide energy consumption, exploration of the deep-sea and deep-sea mining moved further into the focus. Because of the high financial and technical expenses of field experiments, the realization of complex test setups under artificial deep-sea conditions in a laboratory environment becomes more and more relevant. While test rigs with a large application range are widely established in many research areas, there are very few facilities that provide a test environment for experiments under deep-sea conditions. To satisfy the need for a flexible and adaptable test rig, a modular configuration of the rig is suggested. Based on the state of the arts of high-pressure test facilities and a case study, a first concept for such a modular structure of a high-pressure lab environment is presented.

### 1 Einleitung und Motivation

Durch die Verknappung von fossilen Brennstoffen und den gleichzeitigen Anstieg des Weltenergiebedarfs rückte die Erforschung der Tiefsee sowie deren Entwicklung als Raum zur Energiegewinnung in den vergangenen Jahren weiter in den Fokus [1]. Im Zuge der Erschließung der Tiefsee sind sowohl die weitergehende Untersuchung der geophysikalischen, hydrodynamischen und chemischen Prozesse in der Umgebung als auch deren strukturellen Auswirkungen auf eingesetzte Werkstoffe von Bedeutung. Aufgrund des großen finanziellen und technischen Aufwands für die Durchführung von Feldexperimenten gewinnt die Realisierung komplexer Versuchsauf-

---

bauten unter künstlichen Tiefseebedingungen im Labor in diesem Kontext zunehmend an Relevanz.

Während sich in vielen Forschungsbereichen Prüfstände mit einem breiten Anwendungsfeld in großer Zahl durchgesetzt haben, existieren weltweit jedoch nur wenige Versuchsanlagen, die die erforderlichen Randbedingungen für Versuche unter künstlichen Tiefseebedingungen zur Verfügung stellen. Diese sind in der Regel für eine spezifische Fragestellung bzw. ein Experiment entwickelt worden. Eine Adaption der Anlagen für andere Versuchsaufbauten ist nicht oder nur unter großem Aufwand möglich.

Die Ursache für diesen Zustand ist unter anderem in den hohen Anforderungen an die Laborumgebung zu vermuten. Die Betriebsbedingungen mit Drücken bis 500 bar, aggressiven Versuchsmedien und Temperaturgradienten bis weit über 100°C zwischen den verschiedenen Medien bei gleichzeitigem kleinem Bauraum in den Autoklaven stellen eine konstruktive Herausforderung dar [1][2]. Auch in der Mess- und Regelungstechnik sind oftmals Neuentwicklungen oder erhebliche Anpassungen üblicher Systeme erforderlich. Der Grundlagenforschungscharakter einiger Anwendungen verschärft diese Problematik durch z.T. unbekannte chemische und physikalische Reaktionen.

Gleichzeitig erfordert die Erforschung und Erschließung der Tiefsee jedoch eine Vielzahl experimenteller Umsetzungen aus so unterschiedlichen Bereichen wie Meerestechnik, Verfahrenstechnik, Strukturmechanik und Funktionsprüfung. In diesem Zusammenhang bietet sich auch in der Hochdrucktechnik eine modulare Gestaltung der Laboreinrichtung zur zügigen Umsetzung unterschiedlicher Versuchsaufbauten in einer Anlage an.

Basierend auf dem Stand der Technik im Bereich der Hochdruckversuchsanlagen wird mit der Drucklabortechnik des Instituts für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) ein Ansatz zur modularen Gestaltung eines Hochdrucklabors vorgestellt.

## 2 Stand der Technik

Wie bereits einleitend erwähnt, existieren weltweit nur wenige Versuchsanlagen für Experimente unter Tiefseebedingungen, deren Volumen sich in der Größenordnung zwischen 5 und 500l bewegt. Diese wurden oftmals innerhalb spezifischer Forschungsprojekte in Hinblick auf einen bestimmten Forschungsaspekt entwickelt und eingesetzt.

---

So entstand z.B. an der University of Hawai'i ein Drucklabor mit 580l Rauminhalt und einem maximalen Betriebsdruck von 63 bar zur Untersuchung von Methanblasen und -hydraten [3]. Die Versuchsaufbauten wurden dazu fest im Hauptdruckkörper installiert. Diese Anlage wurde jedoch nach Ende des Projektes außer Betrieb genommen.

Am Oak Ridge National Laboratory (Tennessee, USA) wurde der „Seafloor Process Simulator“ mit einem Volumen von 72l und einem maximalen Betriebsdruck von 206 bar entwickelt und ebenfalls zur Erforschung von Methanhydraten eingesetzt. Auch hier ist aus der Literatur nur ein Anwendungsfall bekannt [4].

Das Southwest Research Institute in San Antonio (Texas, USA) betreibt eine Anlage für Strukturtests (hydrostatischer und hydrodynamischer Druck) an Tiefseebauteilen wie Pipelines und ROVs (remotely operated vehicles) [5]. Komplexere Versuchsaufbauten, z.B. für eine vollständige Funktionsprüfung der getesteten Komponenten, sind in dieser Anlage nach derzeitigem Erkenntnisstand bisher nicht realisiert worden.

Haljasmaa et al. entwickelten am National Energy Technology Laboratory (Pittsburgh, USA) einen großformatigen Versuchsaufbau, der einzig zur Untersuchung des Verhaltens einzelner Gasblasen in einem Fluid unter Druck genutzt wird [6].

Neben der Fokussierung auf ein Einsatzgebiet und den festen (wenn auch teilweise reversiblen) Einbau etwaiger Versuchsaufbauten ist diesen Anlagen die Art des Verschlusses gemein. Dieser erfolgt durch zahlreiche großformatige Schraubverbindungen zwischen dem zylindrischen Druckbehälter und seinem Deckel, verbunden mit einem großen Zeit-, Material- und Energieaufwand bei Öffnung und Umbau der Anlagen. So wird die für die bloße Öffnung des „Seafloor Process Simulator“ veranschlagte Zeit von 2 Stunden bereits als kurz und effizient angesehen [7].

### **3 Modular aufgebaute Hochdruckversuchsanlagen am Beispiel des Drucklabors DL2**

Die kurze Vorstellung bestehender Hochdruckversuchsanlagen im vorangegangenen Kapitel zeigt deutlich das Verbesserungspotential in Hinblick auf Vielseitigkeit und schnelle Adaptierbarkeit solcher Anlagen auf. Zur Realisierung dieser Anforderungen bietet sich auch in der Versuchstechnik eine modulare Gestaltung der Anlagen an. Hierbei kann der Druckbehälter selbst als Plattform genutzt werden, die durch verschiedene Module für die Versuchs-

---

durchführung ertüchtigt wird. Eine Anlage mit dem Potential zur Erfüllung des modularen Gedankens stellt das Drucklabor DL2 des Instituts für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik dar. Es unterscheidet sich in einigen Punkten wesentlich von den in Kapitel 2 vorgestellten Anlagen.

### 3.1 Eigenschaften und Anwendungen des DL2

Im Rahmen des Forschungsprojektes OMEGA ist im Jahr 2003 an der Technischen Universität Hamburg-Harburg das Drucklabor DL2 für die Untersuchung von Abschmelzprozessen von Methanhydrat entwickelt worden [9]. Nach Abschluss des Projektes wurde das Drucklabor mit unterschiedlichen Ein- und Aufbauten für weitere Experimente aus dem Bereich der Meerestechnik genutzt (u.a. [8][10]).

Derzeit wird es im Rahmen des Projektes C-IMAGE (Center for Integrated Modeling and Analysis of Gulf Ecosystems) zur Untersuchung der Folgen der Ölkatastrophe im Golf von Mexiko 2010 eingesetzt. In mehreren Stufen wird das Verhalten von am Meeresboden austretendem Öl und Gas von Einzelpartikeln über einphasige Partikelschwärme bis hin zu einer Mehrphasenströmung untersucht [11].

Mit einem maximalen Betriebsdruck von 550 bar und einem Experimentiervolumen von 100l schließt das DL2 die Lücke zwischen in der chemischen und verfahrenstechnischen Forschung gebräuchlichen Kleinstautoklaven („Sichtzellen“) und industriellen Großautoklaven mit mehreren Kubikmetern Rauminhalt.

Das DL2 besteht aus einem Stahlzylinder mit den Innenmaßen 300x1400mm, dessen Boden und Deckel mit Schnellverschlüssen befestigt werden. Diese Schnellverschlüsse in Form einer zweiteiligen Klammer (s. Bild1) ermöglichen ein Öffnen/Schließen des Drucklabors innerhalb von 5 min. Als einziges Werkzeug wird hier ein Kran zum Anheben des Deckels benötigt.

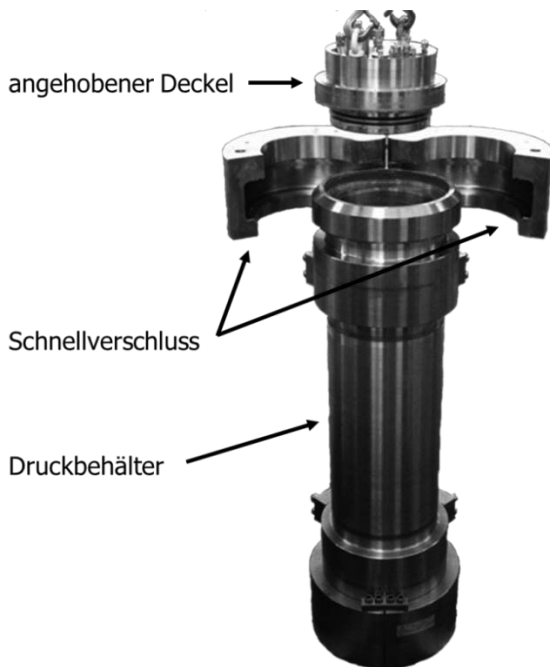


Bild 1: Drucklabor DL2 mit geöffnetem Deckel

### 3.2 Modulare Umsetzung von Versuchsaufbauten im DL2

Verschiedene hydraulische, elektrische, mechanische und optische Zugänge in Boden und Deckel dienen als standardisierte Schnittstellen und ermöglichen eine individuelle Anpassung des Drucklabors an unterschiedliche Test-szenarien sowie den Anschluss weiterer Druckaggregate entsprechend der experimentellen Anforderungen. Hier stehen z.B. ein zusätzlicher Druckbehälter mit 40 l Volumen als Speicher und ein Gleichgangzylinder zum gezielten Verschieben von Fluiden zur Verfügung.

Da die Hydraulikpumpen zur Druckerzeugung und -regelung für den Druckbehälter nur für den Betrieb mit Leitungswasser geeignet sind, wird für die Durchführung von Versuchen mit anderen Medien im Inneren des Drucklabors ein separates Testvolumen durch ein Acrylglasrohr abgetrennt, auf das der Druck mittels einer flexiblen Membran übertragen wird.

Der gesamte Versuchsaufbau mit Messtechnik, gekapseltem Versuchsraum und allen elektrischen und hydraulischen Leitungen wird üblicherweise

---

unterhalb des Deckels montiert und gemeinsam mit diesem in den Hauptdruckbehälter eingesetzt. Diese Kapselung hat den Nachteil, dass sich das Experimentiervolumen gegenüber den maximal möglichen Abmaßen verringert. Gleichzeitig können jedoch Versuchsaufbauten aus unterschiedlichsten Forschungsbereichen außerhalb des Drucklabors vormontiert und bei  $p=1\text{bar}$  getestet werden. Auf diese Weise werden lange Stillstandszeiten im Experimentierbetrieb vermieden und eine effektive Nutzung der knappen Laborzeit gewährleistet.

Auch in den Hilfsaggregaten findet eine räumliche Trennung zwischen druckerzeugendem Leitungswasser und den Versuchsmedien statt. Die Druckerzeugung und -regelung in der gesamten Anlage kann daher unabhängig vom Versuchsaufbau und den eingesetzten Medien durch standardisierte Bauteile erfolgen. Zugleich wird der Verschleiß der Druckaggregate durch aggressive Versuchsmedien sowie der Reinigungsaufwand beim Wechsel der Medien minimiert.

Insgesamt hat ein Versuchsaufbau im DL2 zurzeit also drei wesentliche Bestandteile.

- das Drucklabor selbst als Versuchsplattform mit den zugeordneten Komponenten zur Erzeugung der geforderten Umweltbedingungen (Druck, Temperatur)
- die Hilfsaggregate als optionale, aber nicht variante Module
- ein variantes Versuchsmodul mit standardisierten Schnittstellen im Inneren

Diese drei Bestandteile sind in Bild 22 als Module Interface Graph (MIG) entsprechend der Darstellung einer modularen Produktfamilie im Integrierten PKT-Ansatz visualisiert [12].

Anhand des MIG wird deutlich, dass das Ziel eines modularen Aufbaus in erster Instanz bereits erreicht ist. Die Versuchsplattform DL2 stellt den strukturellen Rahmen und die Umweltbedingungen für die Versuchsdurchführung bereit. Diverse standardisierte Schnittstellen nehmen die varianten, versuchsspezifischen Innenaufbauten auf. Verschiedene (weitestgehend) standardisierte Hilfsaggregate können für die Versuchsdurchführung optional zugeschaltet werden.

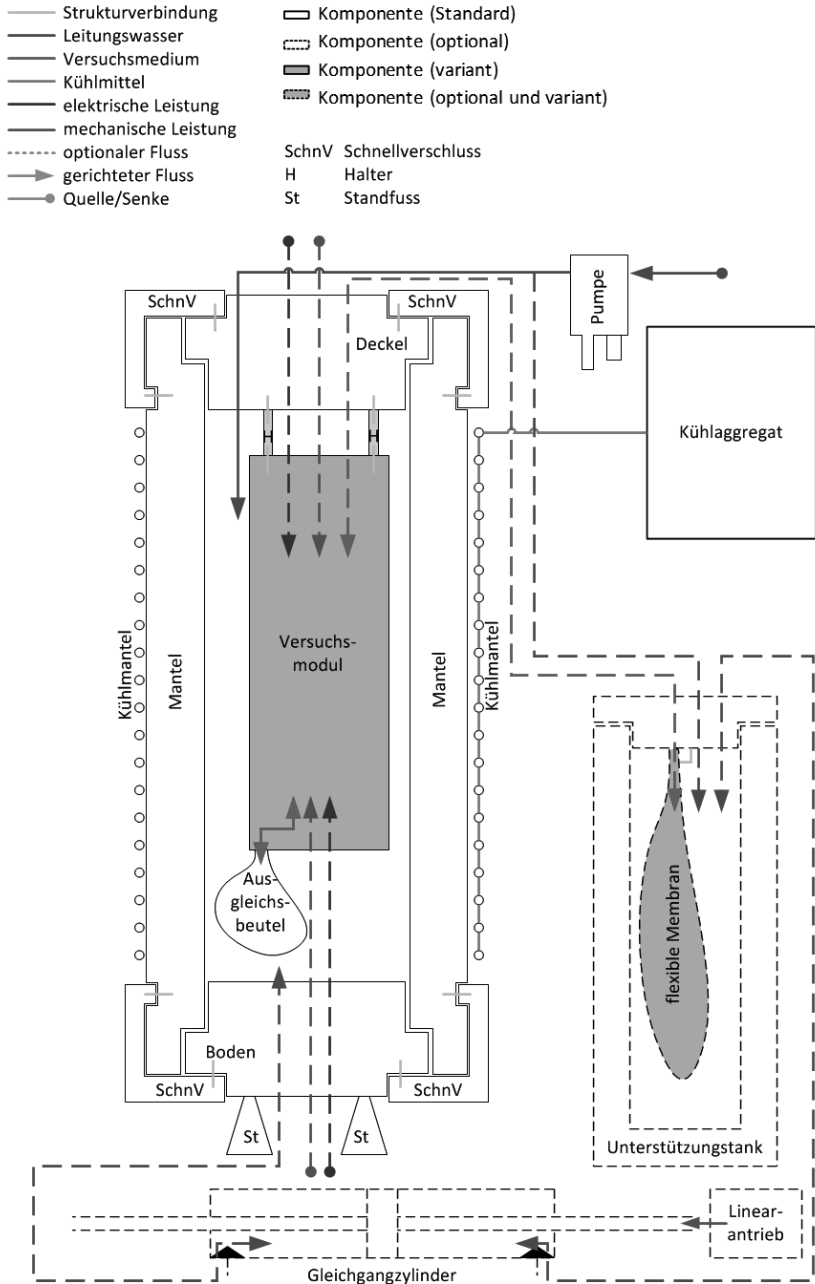


Bild 2: Module Interface Graph des Drucklabors DL2

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass im Bereich der Erschließung und Erforschung der Tiefsee ein Bedarf an vielseitigen, für Anwendungen aus verschiedenen Forschungsfeldern adaptierbaren Versuchsanlagen besteht. Zur Realisierung einer solchen Anlage empfiehlt sich ein Plattformkonzept, bestehend aus einem Druckbehälter als Plattform und variablen Versuchsmodulen.

Mit dem Drucklabor DL2 des Instituts für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik wurde ein Fallbeispiel zur modularen Gestaltung einer Hochdruckversuchsanlage vorgestellt. Die Darstellung im Module Interface Graph (Bild 22) zeigte den bereits sehr großen Anteil an Standardkomponenten am Gesamtprodukt. Die Versuchsaufbauten innerhalb des Drucklabors sind zurzeit jedoch noch hochgradig individuell gestaltet. Bei der Weiterentwicklung des Drucklabors ist die Betrachtungsebene für die modulare Gestaltung folglich auf die Ebene des einzelnen Versuchsmoduls zu verschieben. Langfristig bietet sich damit auch hier eine Plattformstrategie an mit drei verschiedenen Plattformen für die unterschiedlichen Anwendungsgebiete Verfahrenstechnik, Meerestechnik und Strukturmechanik (s. Bild3).

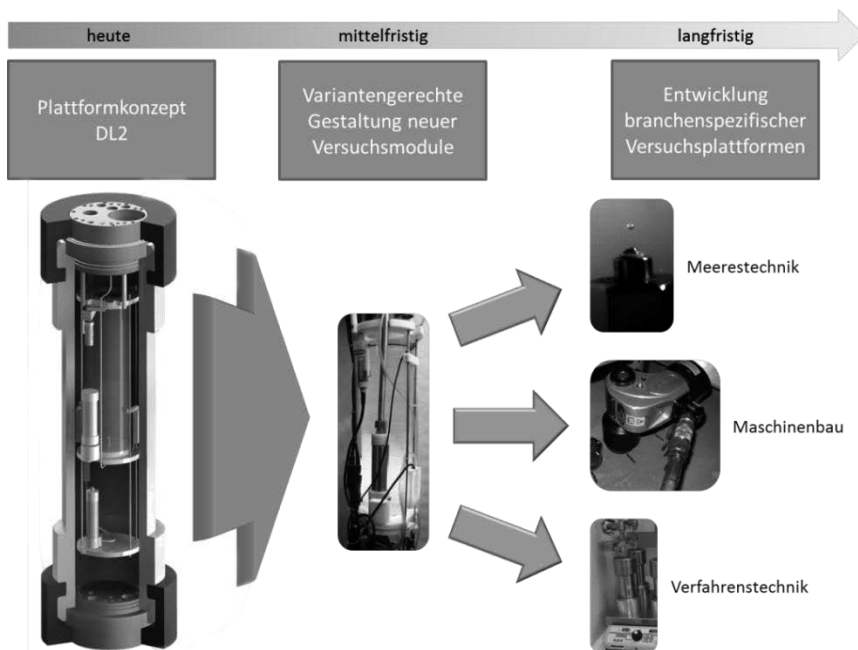


Bild 3: weitere Entwicklung des Drucklabors DL2

---

## Literatur

- [1] McCulley, R.: "Drillers see future in ultra-deep", *Offshore Magazine* 73 (02), S. 36-43, 2013.
- [2] Koschinsky, A.; Garbe-Schoenberg, D.; Sander, S.; Schmidt, K.; Gengerich, H.-H.; Strauss, H.: „Hydrothermal venting at pressure-temperature conditions above the critical point of seawater, 5°S on the Mid-Atlantiv Ridge“, *Geology* 36 (8), S. 615-618, 2008.
- [3] Masutani, S.M., Adams, E.: "Experimental Study of Multiphase Plumes with Application to Deep Ocean Oil Spills", Final Report to U.S. Dept. of the Interior, Minerals Management Service, Contract No. 1435-01-98-CT-30946, 2000.
- [4] Phelps, T.J.; Peters, D.J.; Marshall, S.L.; West, O.R.; Liang, L.; Blencoe, J.G. et al.: "A new experimental facility for investigating the formation and properties of gas hydrates under simulated seafloor conditions", in: *Review of Scientific Instruments* 72 (2), S. 1514–1521, 2001.
- [5] <http://www.swri.org/4org/d18/struceng/marine/pressim/default.htm>, zuletzt aufgerufen am 02.07.2013.
- [6] Haljasmaa, I.V.; Vipperman, J.S.; Lynn, R.J.; Warzinsko, R.P.: "Control of a fluid particle under simulated deep-ocean conditions in a high-pressure water tunnel", *Review of Scientific Instruments* 76 (2), 2005.
- [7] <http://sps.esd.ornl.gov/facilitiestools.html>, zuletzt aufgerufen am 02.07.2013.
- [8] Bigalke, N. K.; Rehder, G.; Gust, G.: „Methane Hydrate dissolution rates in undersaturated seawater under controlled hydrodynamic forces“, *Marine Chemistry* 115 (3-4), S. 226-234, 2009.
- [9] Gust, G.; Steffen, H.; Holscher, B.: „Shallow Marine Gas Hydrates: Dynamics of a Sensitive Methane Reservoir. Subproject 5: Gas Hydrate Pressure Laboratory, Abschlussbericht BMBF-Forschungsvorhaben OMEGA“, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2003.
- [10] Kleeberg, A.; Hupfer, M.; Gust, G.; Salka, I.; Pohlmann, K.; Grossart, H.-P.: "Intermittent riverine resuspension: Effects on phosphorus trans-

---

formations and heterotrophic bacteria", *Limnology and Oceanography*, 58(2), 2013, pp. 635-652.

- [11] Laqua, K.; Malone, K.; Seemann, R.; Meyer, A.; Jäger, P.; Krause, D.; Gust, G.; Schlüter, M.: „Bubble and drop formation under deep-sea conditions“, Gulf of Mexico Oil Spill & Ecosystem Science Conference, New Orleans, 2013.
- [12] Kipp, T.; Bles, C.; Krause D.: Anwendung einer integrierten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien, Design for X - Beiträge zum 21. DfX-Symposium, Hamburg (2010), pp. 157 - 168.

## **Die eigenschaftsbasierte Produktentwicklung unter Berücksichtigung der differenziellen Anforderungen älterer Nutzer**

Thomas Luft<sup>1</sup>, Stefan Kamin<sup>2</sup>, Jörg Miebling<sup>1</sup>, Frieder R. Lang<sup>2</sup>, Sandro Wartzack<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik FAU Erlangen-Nürnberg*

<sup>2</sup>*Institut für Psychogerontologie FAU Erlangen-Nürnberg*

Population aging is one of the most important challenges in human history. Adapting this challenge involves the development of products and services for improving activity, health and quality of life in old age. The development of such products requires interdisciplinary collaboration between disciplines of aging and engineering sciences. This involves integrating the specific needs of older users into product development. The aim of this work is to describe a methodical approach combining behavioural and psychological perspectives on technology use in old age with engineering sciences. This interdisciplinary procedure is described based on the development of a bicycle for improving mobility in old age and focused on the analysis and assessment of differential user requirements. These requirements are translated into a matrix-based product description allowing product developers to derive product properties and to set the required characteristics for each of these properties. As a consequence, this approach may contribute to the improved development of innovative products in old age.

Keywords: design methodology, property-based product development, matrix-based product description, user-centred design, technology and aging

---

## 1 Einleitung und Motivation

Ältere Menschen stellen aufgrund des demographischen Wandels einen signifikanten Wirtschafts- und Konsumfaktor dar, der einen Markt für Produkte und Dienstleistungen entstehen lässt, die Gesundheit, Selbstständigkeit und Aktivität im Alter unterstützen und fördern. Dennoch erfahren technische Neuerungen bei dieser Nutzergruppe oftmals nicht die gewünschte Akzeptanz und Verbreitung, da die Bedienbarkeit und Funktionalität der Produkte nicht den vielfältigen Anforderungen und Möglichkeiten älterer Nutzer entspricht. Bei der Entwicklung innovativer Produkte für ältere Menschen ist es für Unternehmen daher essentiell, die von der Nutzergruppe ausgehenden Anforderungen und Wünsche exakt zu erfassen. Daher sind diese Nutzeranforderungen bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung einzubeziehen.

Insbesondere zur Berücksichtigung der differenziellen Anforderungen von Nutzern benötigen Produktentwickler eine geeignete Vorgehensweise. Deshalb wurden etablierte Prozess- und Vorgehensmodelle sowie konstruktionsmethodische Ansätze in der Produktentwicklung hinsichtlich ihrer Eignung zur eigenschaftsbasierten Produktentwicklung und Nutzereinbindung bewertet [4], [14]. Diese Bewertung hat gezeigt, dass es gegenwärtig kein geeignetes Vorgehensmodell in der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung gibt, um die Anforderungen älterer Nutzer ausreichend zu berücksichtigen.

Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, alterns- und ingenieurwissenschaftliche Ansätze zu verknüpfen und eine interdisziplinäre Vorgehensweise für die Produktentwicklung aufzuzeigen. Hierbei werden die differenziellen Anforderungen älterer Nutzer an eine zu entwickelnde technische Lösung erhoben und in eine matrixbasierte Produktbeschreibung überführt. Das Vorgehen wird anhand der alternsensiblen Entwicklung eines Fahrrads dargestellt. Das Fahrrad ist bei über 60-Jährigen ein häufig genutztes Verkehrsmittel zur Aufrechterhaltung der alltäglichen Mobilität [7]. Mit zunehmendem Alter führen gesundheitliche Einschränkungen und veränderte Bedürfnisse zu einem Rückgang der Nutzung [7]. Die Entwicklung eines Fahrrads unter Berücksichtigung der sich verändernden differenziellen Anforderungen und Potentiale älterer Menschen kann einen Beitrag leisten, um Mobilität bis in das höchste Lebensalter zu fördern und zu unterstützen.

## 2 Stand der Technik und Wissenschaft

In diesem Kapitel werden grundlegende Aspekte der Techniknutzung im Alter sowie Grundlagen zur matrixbasierten Produktbeschreibung vorgestellt.

---

## 2.1 Bedingungen der Techniknutzung im Alter

Der Alternsprozess ist durch vielschichtige Veränderungen in unterschiedlichen Fähigkeitsbereichen gekennzeichnet. So stehen biologischen Altersverlusten in körperlichen und kognitiven Bereichen (z.B. Aufmerksamkeit, körperliche Leistungsfähigkeit) auch immer die Stärken und Gewinne des Alters gegenüber (z.B. Weisheit, emotionales Erleben). Die Dynamik von Gewinnen und Verlusten verläuft differenziell zwischen Personen und führt zu einer enormen Vielfalt an Kompetenzen, Bedürfnissen und Einschränkungen älterer Menschen [1]. Diese Perspektive ist in einer alternsensiblen Produktentwicklung essentiell, denn gerade bei Produkten für ältere Menschen muss die Heterogenität der Zielgruppe betrachtet werden. Hierzu ist ein Verständnis des komplexen Zusammenspiels der Kompetenzen älterer Nutzer und den Anforderungen technischer Lösungen erforderlich.

Die Interaktion zwischen Nutzer und Technik kann auf Grundlage theoretischer Überlegungen der Person-Technik-Passung beschrieben werden (Bild 1). In Anlehnung an das Umwelt-Anforderungs-Kompetenz-Modell von Lawton und Nahemow erzielen technische Lösungen eine hohe Nutzungsbereitschaft, wenn diese die Kompetenzen älterer Menschen optimal abrufen [6], [15]. Kompetenzen sind hierbei auf alterskorrelierte Veränderungen in kognitiven und körperlichen Funktionsbereichen bezogen. So kann die Benutzung eines Fahrrads hohe Anforderungen an sensomotorische Fähigkeiten (z.B. Greifen) und die Verbindung kognitiver und motorischer Prozesse stellen (z.B. geteilte Aufmerksamkeit durch Treten und Raumorientierung). Übersteigen die Produktanforderungen individuelle nutzungsrelevante Kompetenzen, so kann dies zu Überforderung und Nichtnutzung der technischen Lösung führen. Ebenso besteht das Risiko der Unterforderung, wenn vorhandene Kompetenzen nicht genutzt werden. Die Variabilität individueller Entwicklungsverläufe erfordert hierbei eine differenzierte Erfassung der Anforderungen älterer Nutzer an zu entwickelnde technische Lösungen.

Die Person-Technik-Interaktion umfasst auch motivationale Prozesse der Zielauswahl und Zielverfolgung [3]. Interindividuelle Unterschiede in motivationalen Prozessen können vielgestaltigen Veränderungen über die gesamte Lebensspanne unterliegen. So führt etwa die zunehmende Bedeutung kurzfristig erreichbarer Ziele zu einer Priorisierung des gegenwärtigen Wohlbefindens im Alter [5]. In diesem Kontext basieren Nutzungsentscheidungen vor allem auf emotional relevanten Vor- oder Nachteilen [12]. So nimmt mutmaßlich auch die Bedeutung technischer Funktionalitäten zu, die Sicherheit und Teilhabe im täglichen Leben älterer Menschen unterstützen. Die Ausprägung solcher Motivationslagen steht in direkter Interaktion mit den Ressourcen und

Anforderungen sozialer und räumlicher Umwelten. So stehen die Nutzungsvorteile eines Fahrrads vermutlich in Zusammenhang mit der Anzahl emotional bedeutsamer Mobilitätsziele (z.B. Familie in der Nähe). Die Erfassung von Nutzeranforderungen soll somit das Zusammenspiel zwischen Person und Technik vor dem Hintergrund der Lebenskontexte im Alter berücksichtigen.

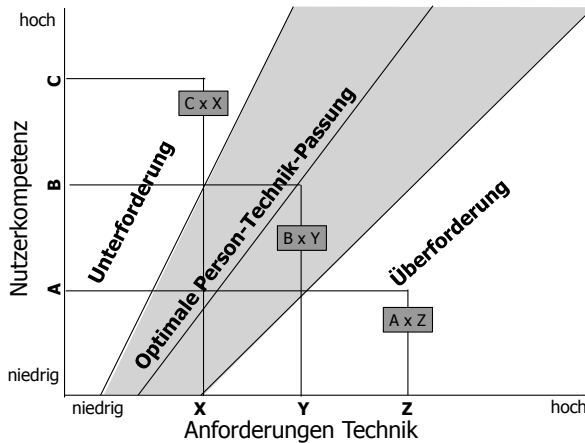


Bild 1: Modell der Person-Technik-Passung nach Lawton und Nahemow [6]

## 2.2 Grundlagen zur matrixbasierten Produktbeschreibung

Aufgrund des in Kapitel 1 skizzierten Handlungsbedarfs hat Krehmer ein Vorgehensmodell für die eigenschaftsbasierte Produktentwicklung erarbeitet, das sich aus den drei Bestandteilen „Vorgehensmodell“, „Mikrozyklus der Synthese bzw. der Analyse“ und „Matrixbasierte Produktbeschreibung“ (MPB) zusammensetzt [4], [10], [11]. Diese drei Bestandteile sowie ihr Zusammenwirken sind in Bild 2 vereinfacht dargestellt. Dabei werden die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Anforderungen (ANF), Merkmalen (MER) und Eigenschaften (EIG) sowie dem daraus resultierenden Verhalten (VER) durch eine MPB mittels einer Multi-Domain-Mapping Matrix (MDM) abgebildet [11]. Diese MDM setzt sich aus verschiedenen Design Structure Matrices (DSM) und Design Mapping Matrices (DMM) zusammen [11].

Die MPB ermöglicht es, ausgehend von bereits erhobenen Anforderungen, die komplexen Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Merkmalsfestlegungen und deren Auswirkungen auf die Eigenschaften des Produktes zu verstehen. Dabei sind die Merkmale (z.B. Steuerrohrwinkel, Felgenradius) die direkten Stellschrauben des Produktenwicklers zur Bestimmung der Eigen-

schaften (z.B. Lenkerhöhe, Nachlauf) eines Produkts [11]. Das Produktverhalten (z.B. Lenkverhalten) ergibt sich unter Berücksichtigung bestimmter Nutzungs- (z.B. Trittkraft) und Umgebungsbedingungen (z.B. Fahrbahnbeschaffenheit) als Folge des realisierten Eigenschaftsprofils des Produkts [4], [11]. Mit Hilfe der vielfältigen Abhängigkeiten lässt sich analysieren, welche Änderungen bestimmter Merkmale zu welchen Eigenschaften führen, um die bereits erhobenen Nutzeranforderungen zu erfüllen [11].

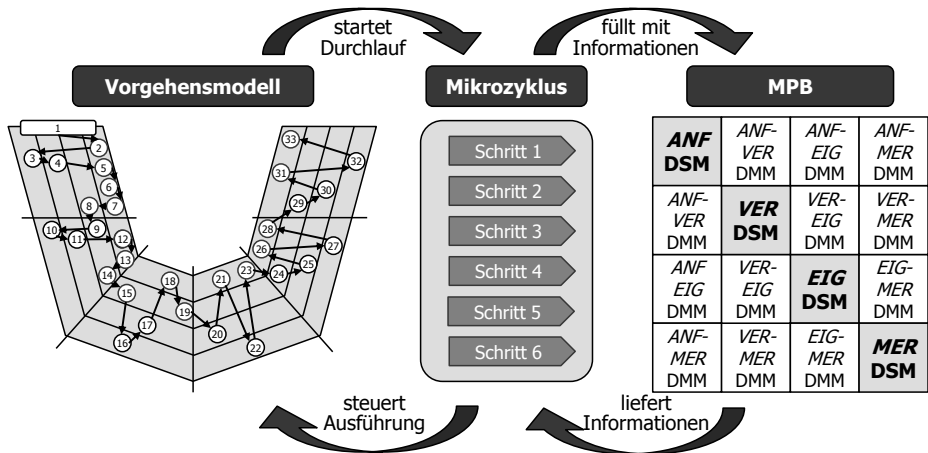


Bild 2: Zusammenwirken der drei Bestandteile des Vorgehensmodells [11]

### 3 Ansatz für eine interdisziplinäre Vorgehensweise

Die übergeordnete Zielsetzung des vorliegenden Beitrags ist die Entwicklung einer interdisziplinären Vorgehensweise für die MPB eines Fahrrads unter Berücksichtigung der differenziellen Anforderungen älterer Menschen. Das Radfahren ist bei 60-75-Jährigen weit verbreitet und zentral für die Aufrechterhaltung von Mobilität, Gesundheit und gesellschaftlicher Teilhabe [7]. Mit zunehmendem Alter verändern sich die Anforderungen an das Fahrrad, welches oftmals nicht mehr den veränderten Kompetenzen und Möglichkeiten älterer Menschen entspricht. Die Entwicklung eines Fahrrads unter Berücksichtigung der sich verändernden differenziellen Anforderungen der Zielgruppe kann hier einen wichtigen Beitrag leisten, um Fahrradmobilität auch im höheren Lebensalter zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Entwicklung ist die prozessbegleitende Nutzereinbindung von zentraler Bedeutung. Die interdisziplinäre Verbindung alterns- und ingenieurwissenschaftlicher Ansätze wird auch als Gerontotechnik bezeichnet und bildet die Grundlage für eine moderne und alterssensitive Produktentwicklung (Bild 3).

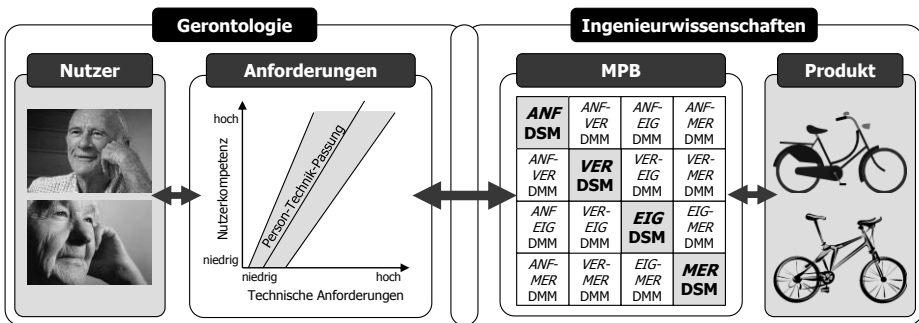


Bild 3: Überblick über die interdisziplinäre Vorgehensweise

Die gerontologische Forschung kann einen Beitrag leisten, um Altersprozesse und die resultierende Heterogenität älterer Nutzer sowie deren individuelle Bedürfnisse zu berücksichtigen und in Nutzeranforderungen zu übersetzen. Diese Anforderungen können durch eine MPB erfasst und mit den zu erreichenden Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts verknüpft werden. Zur Realisierung dieser Produkteigenschaften müssen vom Entwickler geeignete Merkmale festgelegt werden [4], [11].

Mit Hilfe dieser MPB können Abhängigkeiten zwischen Nutzeranforderungen, Produktmerkmalen und -eigenschaften sowie dem Verhalten systematisch analysiert werden. Das daraus gewonnene Wissen leistet einen wertvollen Beitrag für die Entwicklung innovativer Produkte, die an die heterogenen Veränderungen des Alters adaptierbar sind. Diese interdisziplinäre Vorgehensweise (vgl. Bild 3) wird in diesem Kapitel exemplarisch im Rahmen der alternssensiblen Entwicklung eines Fahrrads, was von unterschiedlichen älteren Menschen gut genutzt werden kann, vorgestellt.

### 3.1 Ermittlung der Anforderungen älterer Nutzer an ein Fahrrad

Für die Ermittlung der Anforderungen älterer Nutzer an ein zu entwickelndes Produkt müssen zwei Fragestellungen fokussiert werden: Erstens, welche Faktoren führen zu einer Nutzung bzw. zu einer Nichtnutzung der technischen Lösung hinsichtlich der Interaktionspunkte zwischen Person und Technik? Zweitens, welchen Nutzen hat eine technische Lösung innerhalb der sozial-räumlichen Umwelt? Die erste Frage ist auf die Interaktion zwischen personalen Kompetenzen und technischen Anforderungen bezogen. Die zweite Frage berücksichtigt die motivationale Komponente der Techniknutzung und rekurriert auf den Nutzen technischer Funktionalitäten innerhalb sozio-physischer Lebenskontexte älterer Menschen.

---

Die Exploration beider Fragestellungen erfordert eine intensive und multiperspektivische Betrachtung der Zielgruppe durch den strukturierten und theoriegeleiteten Einsatz verschiedener Methoden der Nutzereinbindung. Der vorliegende Ansatz adaptiert die von Hackel und Klebl vorgeschlagene Methodentriangulation [2] auf den Kontext der Nutzereinbindung in der altersgerechten Produktentwicklung. Der Begriff der Methodentriangulation beschreibt den Einsatz verschiedener Methoden zur differenziellen Betrachtung eines Forschungsgegenstandes. Im Rahmen der Anforderungsanalyse hat die Triangulation den Vorteil, die Perspektive für die Identifikation von Nutzeranforderungen zu erweitern. Weiterhin kann der Einsatz unterschiedlicher Methoden zur Validierung und besseren Absicherung der Ergebnisse beitragen. Der Methodeinsatz erfolgt in den folgenden drei Schritten.

In einem ersten Schritt werden individuelle Sichtweisen verschiedener Zielgruppenvertreter durch halbstandardisierte Einzelinterviews erfasst. Im Rahmen dieser Einzelinterviews wird die Interaktion zwischen sensorischen, motorischen und kognitiven Funktionsbereichen sowie unterschiedlichen Anforderungsgraden verschiedener Fahrradtypen thematisiert. Im Mittelpunkt stehen die Erfahrungen und Wahrnehmungen der Befragten zu spezifischen Interaktionspunkten zwischen Person und Fahrrad. Weiterhin werden retrospektive Veränderungen der Interaktion sowie die Einschätzung der zukünftigen Nutzung in Abhängigkeit erwarteter Altersveränderungen exploriert. Der Gesprächsinhalt wird analog zur zweiten Fragestellung auf die Bedeutsamkeit des Fahrrads für die eigene Lebenssituation erweitert. Dies ist notwendig, da sich die Interaktion mit einem technischen Produkt innerhalb von Lebensumwelten des Alterns vollzieht. Dies kann zu spezifischen Anforderungen an technische Funktionalitäten und Produkteigenschaften (z.B. Rahmensteifigkeit, Sitzhöhe) führen.

Im nächsten Schritt werden die als Audioaufzeichnung vorliegenden Einzelinterviews transkribiert und als Wissensstrukturen visualisiert. Die Visualisierung der Wissensstrukturen erfolgt über das Concept-Mapping. Hierbei handelt es sich um eine Methode der Wissenserfassung. Das Ziel der Concept-Maps besteht in einer Darstellung der ermittelten Zusammenhänge die zu einer Nutzung oder Nichtnutzung von Fahrrädern führen. Über die Visualisierung der ermittelten Wissensstrukturen werden physiologische, kognitive und motivationale Bedingungen der Fahrradnutzung aufgedeckt und die differenziellen Anforderungen älterer Nutzergruppen abgeleitet.

Die erstellten Concept-Maps dienen im dritten Schritt als Diskussionsgrundlage für ein Gruppeninterview. Das Gruppeninterview (Fokusgruppe) inkludiert die Teilnehmer der Einzelinterviews und erweitert die Perspektive

---

für die weitere Identifikation der Anforderungen an die Entwicklung eines alternssensiblen Fahrrads. Die Concept-Maps dienen hierbei als Leitfaden für die Gesprächsführung und können je nach Gesprächsverlauf erweitert und revidiert werden. Als Arbeitsergebnis liegen die transkribierten Audioaufzeichnungen sowie die erweiterten Concept-Maps vor.

Die resultierenden qualitativen Daten werden inhaltsanalytisch ausgewertet, um ein differenziertes Bild der Anforderungen an die Entwicklung eines alternssensiblen Fahrrads zu bekommen. Die ermittelten Anforderungen spiegeln differenzielle Person-Technik-Passungen wieder. So ist es denkbar, dass Personen mit einem bestimmten Kompetenzniveau das Fahrrad vorrangig auf asphaltierten Kurzstrecken einsetzen und einen niedrigen Einstieg benötigen. Diese differenziellen Anforderungen älterer Nutzer stellen den Ausgangspunkt für die MPB dar und sind infolgedessen entscheidend für die eigenschaftsbasierte Entwicklung alternssensibler Produkte.

### 3.2 Matrixbasierte Produktbeschreibung eines Fahrrads

Das Ziel der in diesem Beitrag vorgestellten Vorgehensweise stellt die MPB des Gesamtsystems Fahrrad dar. Hierfür ist die vorausgegangene Erhebung und Analyse der differenziellen Anforderungen älterer Nutzer die entscheidende Grundlage. Diese Nutzeranforderungen werden mit weiteren Anforderungen vervollständigt [4] und mittels der DSM strukturiert abgebildet und zueinander in Beziehung gesetzt (vgl. Bild 4).

Infolgedessen kann auf das geforderte Fahrradverhalten geschlossen werden. Dabei werden die einzelnen Verhaltensaspekte durch DSMs erfasst und über DMMs mit den Anforderungen verknüpft. Da das Produktverhalten nicht nur durch das Profil der Produkteigenschaften sondern auch durch die Nutzungs- und Umgebungsbedingungen bestimmt wird, müssen auch diese drei Domänen jeweils durch DSMs abgebildet und durch DMMs wechselseitig zueinander in Beziehung gesetzt werden [11]. Da Produktentwickler weder die Nutzungs- noch die Umgebungsbedingungen beeinflussen können, haben diese lediglich die Möglichkeit, durch die Festlegung geeigneter Merkmale bestimmte Produkteigenschaften zu realisieren [4], [11].

Für eine MPB, die insbesondere die nutzerspezifischen Anforderungen berücksichtigt, muss ein besonderes Augenmerk auf die Interaktionspunkte (IP) zwischen Mensch und Fahrrad gelegt werden, da der Nutzer über diese IPs das Fahrradverhalten beeinflussen kann bzw. wahrnimmt. Bei diesen IPs handelt es sich um drei bzw. fünf Kontaktpunkte zwischen beiden Systemen „Mensch“ und „Fahrrad“: IP 1 (Hände – Lenkergriffe), IP 2 (Füße – Pedale) und IP 3 (Gesäß – Sattel). Die Position der IPs zueinander stellt die Grundlage

für alle ergonomischen Analysen des Menschen mit dem Fahrrad dar und hat auch Auswirkungen auf weitere Verhaltensaspekte. Bezüglich der ergonomischen Betrachtungen spielen besonders die individuellen Körpermaße des Menschen eine entscheidende Rolle (z.B. Relation des Körpers zur Fahrradrahmengröße). Diese werden zusammen mit weiteren Anforderungen in einer DSM erfasst und durch DMMs mit den anderen Domänen (z.B. VER, EIG, MER) in Beziehung gesetzt. Zudem können die IPs als Grundlage für die Erstellung einer Produkt- und Funktionsstruktur verwendet werden. Diese erfolgt dabei überwiegend unter dem Gesichtspunkt der geometrieorientierten Produktbeschreibung. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf den funktionsrelevanten Teilsystemen und Bauteilen (z.B. Rahmenbauteile), die durch eine MPB beschrieben werden.

Die MPB wird in diesem Beitrag exemplarisch anhand einer stark vereinfachten und nicht vollständigen DMM (EIG→ MER) erläutert (vgl. Bild 4). Zudem gilt es zu beachten, dass der folgenden DMM die amerikanische Lesekonvention zugrunde liegt (d.h. „Spalte hat Einfluss auf Zeile“). In dieser DMM wird daher der Einfluss der Merkmale auf die daraus resultierenden Eigenschaften dargestellt. Im Gegensatz zu [9] werden die Abhängigkeiten zwischen Merkmalen und Eigenschaften nicht durch Ziffern sondern durch Buchstaben als Abkürzung für die Intensität bzw. Einflussart Hoch (H), Mittel (M) und Gering (L) beschrieben.

Eigenschaften Merkmale DMM		Merkmale																	
		IP 1: Lenker				IP 2				IP 3									
		Lenkervorbau.	Steuerkopfw.	Gabellänge	Steuerkopfrohl.	Gabelschafft.	Felgenradius	Lenkerbreite	Rücksprung. Ga.	Tretlagerposit.	Verbindungsst.	Tretkurbellänge	Rahmenlänge	Hinterbaulänge	Sitzrohrlänge	Rahmenhöhe	Sitzrohrwinkel	Sitzhöhe	Sattellänge
a. Eig.	IP 1: Lenker	Vorderbaulänge	H						H	H			H			H	H		
	Radstand	M						M	M			M	H		M	M			
	Lenkerhöhe	H	H		H	H		H											
	Reichweite	M	M	G	M	M	G	H	G	G		M		G		M	G		
	Nachlauf	H					H		H										
	Fußfreiheit	M					H		M	M		H	M			M	M		
	Tretlagerhöhe						H			H									
	Durchstiegshöhe						H				H								
	Sitzwinkel	G	G	G	G	G	G		G	G			G		G		G	G	
	Sattelhöhe						M		M								H	H	
Rahmensteifigkeit	M			H		M		M	M	M		H	H			H			
Gesamtmasse	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	

Bild 4: Stark vereinfachte DMM (Eigenschaften→Merkmale)

So wird beispielsweise die Eigenschaft Lenkerhöhe nur durch die Festlegung der Merkmale Steuerkopfwinkel, Gabellänge, Gabelschafftlänge, Felgen-

---

radius und Rücksprung/Gabelversatz bestimmt. Diese Merkmale haben eine hohe Intensität (primäre bzw. direkte Abhängigkeit) auf die Lenkerhöhe. Das Merkmal Felgenradius hat auf die Sattelhöhe einen mittleren bzw. sekundären Einfluss (z.B. indirekt über die Eigenschaft Tretlagerhöhe). Der DSM (EIG→EIG) ist beispielsweise zu entnehmen, dass die Tretlagerhöhe einen hohen Einfluss auf die Sattelhöhe und einen geringen Einfluss auf den Sitzwinkel hat. Diese MPB, die alle Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen (geometrischen) Merkmalen, Eigenschaften und Verhalten enthält, kann beispielsweise durch Versuche an einem Fahrradergometer mit voll verstellbarer Rahmengeometrie validiert werden.

#### 4 Zusammenfassung, Evaluation und Ausblick

Die frühzeitige Berücksichtigung der differenziellen Anforderungen und Möglichkeiten (Potentiale) älterer Menschen ist essentiell für die Entwicklung innovativer und alterssensibler Produkte. Hierfür stellt die in diesem Beitrag vorgestellte interdisziplinäre Vorgehensweise eine entscheidende Grundlage dar. Dabei werden mit Hilfe von Methoden der Nutzereinbindung zunächst die Nutzerkompetenzen in Relation zu den technischen Anforderungen eines bestimmten Produktes gesetzt. Das Modell der Person-Technik-Passung stellt hierbei den theoretischen Rahmen dar, um die Bedingungen und Implikationen der Techniknutzung älterer Menschen aufzudecken. Hierbei kann das Modell sowohl prädiaktiv im Rahmen der Anforderungsanalyse als auch evaluativ in fortgeschrittenen Entwicklungsstadien eingesetzt werden. Die Nutzeranforderungen bilden die Grundlage zur Beschreibung des geforderten Produktverhaltens. Neben den Nutzungs- und Umgebungsbedingungen ergibt sich das realisierte Verhalten aus dem Eigenschaftsprofil des Produkts. Diese Produkteigenschaften werden durch die bewusste Festlegung von Merkmalen durch den Produktentwickler bestimmt. Zur Ermittlung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen in einem technischen System wird die MPB angewendet. Über die MPB können die abgeleiteten Nutzeranforderungen gebündelt und in Eigenschaften und Merkmale eines Fahrrads übersetzt werden. Hierdurch werden die Auswirkungen von Merkmalsänderungen auf Produkteigenschaften sichtbar gemacht und differenziellen Anforderungen mit den bauteil-, baugruppen- und gesamtproduktübergreifenden Eigenschaften und Merkmalen des Fahrrads in Beziehung gesetzt.

Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten soll die Anwendbarkeit der Vorgehensweise anhand der Entwicklung eines alterssensiblen Fahrrads validiert und erweitert werden. Im Fokus der Entwicklung steht die technische Adaptabilität des Produkts. Dabei beschreibt die Adaptabilität technischer Lösungen eine kontinuierliche Anpassung an veränderbare, altersdifferenzielle

---

Anforderungen älterer Nutzer [3], [8]. Hierzu werden Nutzeranforderungen mit Zielgruppenvertretern erhoben und differenzielle Person-Technik-Passungen abgeleitet. Diese stellen den Referenzrahmen für das zu entwickelnde Produkt dar. Weiterhin wird in Simulationen und experimentellen Versuchen die mechanische Belastbarkeit und die Lebensdauer einzelner Bauteile, Baugruppen sowie des Gesamtsystems evaluiert. Die Nutzereinbindung soll zukünftig auch mit Hilfe von digitalen Menschsimulationen erweitert werden. Hierbei sind vor allem Simulationen mit alters- und leistungsadaptierten biomechanischen digitalen Menschmodellen vielversprechend [13].

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und deren Gutachtern ausdrücklich für die Förderung des Forschungsprojekts „Produktorientiertes Prozessmanagement – Iterationsmanagement auf Basis eines eigenschaftsbasierten Produktreifegrades“.

## Literatur

- [1] Baltes, P. B.: "Theoretical Propositions of Life-Span Developmental Psychology: On the Dynamics Between Growth and Decline", *Developmental Psychology*, vol. 23, 1987, 611–626.
- [2] Hackel, M.; Klebl, M.: "Qualitative Methodentriangulation bei der arbeitswissenschaftlichen Exploration von Tätigkeitssystemen", *Forum Qualitative Sozialforschung*, vol. 9, 2008.
- [3] Kamin, S. T.; Lang, F. R.: "The subjective technology adaptivity inventory (STAI): A motivational measure of technology usage in old age", *Gerontechnology*, in press.
- [4] Krehmer, H.: "Vorgehensmodell zum Iterations- und Produktreifegradmanagement in der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung", *Fortschrittsberichte VDI, Reihe 1, Band 416*, VDI-Verlag, 2012.
- [5] Lang, F. R.: "Social motivation across the life span", *Growing together. Personal relationships across the life span*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004, 341–367.
- [6] Lawton, M. P.; Nahemow, L.: "Ecology and the aging process", *The psychology of adult development and aging*, American Psychological Association, Washington D.C., 1973, 619–674.

- 
- [7] Limbourg, M.; Matern, S.: "Erleben, Verhalten und Sicherheit älterer Menschen im Straßenverkehr: Eine qualitative und quantitative Untersuchung", *Mobilität und Alter*, vol. 04, Köln, TÜV Media, 2009.
- [8] Lindenberger, U.: "Technologie im Alter: Chancen aus Sicht der Verhaltenswissenschaften", *Die Zukunft des Alterns. Die Antwort der Wissenschaft*, Beck, München, 2007, 220–239.
- [9] Luft, T.; Bochmann, J.; Wartzack, S.: "Enhancing the flow of information in the PLM by using numerical DSMs – an industrial case study", *Proceedings of the IFIP WG5.1 – 10th International Conference on Product Lifecycle Management – PLM 2013*, Nantes, 2013.
- [10] Luft, T.; Krehmer, H.; Wartzack, S.: "An advanced procedure model for property-based product development", *18th International Conference on Engineering Design – ICED 2013*, to be published, Seoul, 2013.
- [11] Luft, T.; Wartzack, S.: "Die matrixbasierte Produktbeschreibung als Bestandteil des Vorgehensmodells in der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung", *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung – SSP 2013*, Stuttgart, 2013.
- [12] Melenhorst, A.-S.; Rogers, W. A.; Bouwhuis, D. G.: "Older adults' motivated choice for technological innovation: Evidence for benefit-driven selectivity", *Psychology and Aging*, vol. 21, 2006, 190–195.
- [13] Miehling, J.; Wartzack, S.: "Konzeption biomechanischer digitaler Senioren-Menschmodelle zur Anwendung in der altersgerechten Produktentwicklung", *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung – SSP 2013*, Stuttgart, 2013.
- [14] Stöber, C.: "Eigenschaftsbasierte Unterstützung für die Entwicklung von Produkten für ältere Personen", *Fortschrittsberichte VDI, Reihe 1, Band 420*, VDI-Verlag, 2013.
- [15] Williger, B.; Lang, F. R.: "Senioren als Zielgruppe der Produktentwicklung", *Leitfaden für die altersgerechte Produktentwicklung*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2012, 13–25.

# Pflege modularer Produktfamilien nach dem Markteintritt durch die Produktentwicklung

Tammo Bahns, Dieter Krause  
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Technische Universität Hamburg-Harburg*

## 1 Einleitung

Modulare Produktfamilien bilden eine Teilmenge der Produkte mit einer modularen Architektur. Sie werden gezielt eingesetzt, um unterschiedliche Produktvarianten zu realisieren und gleichzeitig im Unternehmen die Unterschiede zwischen Bestandteilen zu minimieren. Hierzu werden die gleichen Module in unterschiedlichen Produktvarianten verwendet, wodurch die interne Varianz und somit die Komplexität im Unternehmen reduziert werden soll. Basierend auf dieser geringen internen Varianz ist es möglich, mit den unterschiedlichen Produktvarianten verschiedene Marktsegmente zu bedienen, das heißt, eine große externe Varianz zu generieren.

Modulare Produktfamilien bieten viele Vorteile gegenüber individuellen Einzellösungen, sie stellen die Produktentwicklung aber auch vor große Herausforderungen, weil die Entwicklung der modularen Produktfamilien komplexer ist [1]. Gegen den Einsatz von modularen Produktfamilien werden zusätzlich Argumente, wie ein Verlust an Flexibilität und Marktorientierung, vorgebracht, da hier Produktänderungen nur in größeren Zeiträumen wirtschaftlich vertretbar seien [2]. Dabei gibt es viele Gründe, die es notwendig und strategisch sinnvoll machen, durch gezielte Veränderungen die modulare Produktfamilie nach dem Markteintritt an ein neues Umfeld anzupassen, ohne einen neuen Produktfamilienlebenszyklus zu beginnen.

---

Ziel dieses Beitrags ist es, die Pflege einer in den Markt gebrachten modularen Produktfamilie, das heißt die Veränderung der Produktfamilie innerhalb des Produktlebenszyklus, zu untersuchen. Hierzu wird, basierend auf Literatur und Erkenntnissen aus Industrieprojekten mit der Luftfahrtindustrie, die Thematik dargestellt und die Relevanz für die Produktentwicklung begründet. Anschließend wird ein Ansatz, der in dieser Form noch nicht in der Literatur zu finden ist, für eine später zu entwickelnde Methodik zum Umgang mit den Änderungen beschrieben. Ziel des Ansatzes ist es, sicherzustellen, dass die Pflege der Produktfamilie bereits in der Produktstrukturierung beachtet und bei der Durchführung effizient vorgegangen wird, damit nicht die Gefahr besteht, dass die interne Varianz unkontrolliert zunimmt und die Vorteile der modularen Produktfamilie sukzessiv zunichtegemacht werden.

## 2 Varianz im Produktlebenszyklus

Im Folgenden wird die Varianz in modularen Produktfamilien untersucht und es wird erläutert, wie diese zurzeit in Modularisierungsmethoden behandelt wird. Zusätzlich wird dargestellt, warum es in vielen Fällen nicht sinnvoll und möglich ist, eine modulare Produktfamilie zu entwickeln, die bis zur nächsten Produktgeneration nicht mehr verändert werden muss.

### 2.1 Varianz von modularen Produktfamilien

Matin et al. [3] bezeichnet die dem Markt zu einem definierten Zeitpunkt angebotene Produktvielfalt als räumliche Varianz und grenzt sie von der Generationsvarianz zwischen Produktgenerationen ab (s. Bild 11).

Setzt sich ein Produktprogramm aus unabhängigen Einzellösungen zusammen, gibt es keine prinzipielle Verbindung zwischen den Elementen, aus denen die räumlichen Produktvarianten hergestellt werden. Eine Produktvariante kann somit weiterentwickelt oder verändert werden, ohne die anderen räumlichen Produktvarianten zu beeinflussen. Modulare Produktfamilien hingegen basieren auf dem Prinzip, dass die räumliche Produktvarianz aus einem System von möglichst kommunal verwendeten Modulen generiert wird. Das Verändern oder Hinzufügen einer räumlichen Produktvariante ist immer mit einer Veränderung der modularen Produktfamilie verbunden und kann somit Auswirkungen auf die anderen Produktvarianten haben.

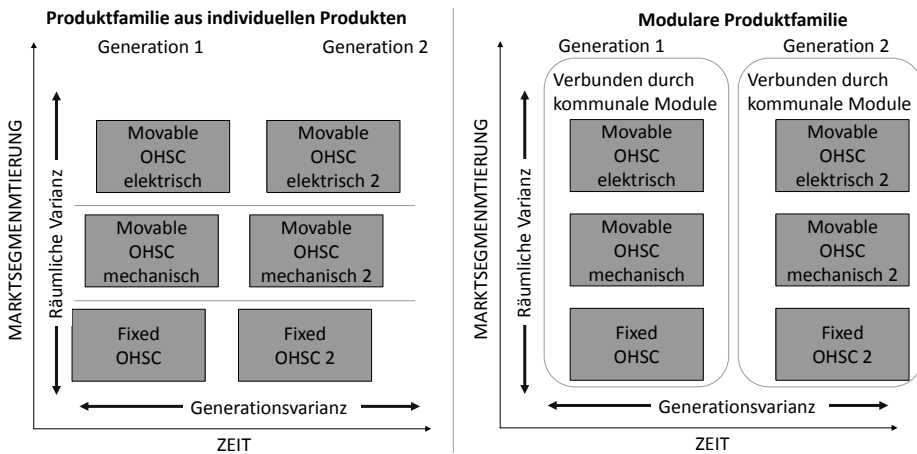


Bild 1: Varianz in individuellen Produkten und in modularen Produktfamilien

Kipp [4] stellt dar, dass in vielen Firmen die Vielfalt der angebotenen Produkte im Laufe der Jahre gewachsen ist und aufgrund der fortschreitenden Globalisierung und Individualisierung kontinuierlich weiter anwachsen wird. Gerade in Käufermärkten orientiert sich der Markt mit seinen Produkthanforderungen weniger an den oft längerfristigen Entwicklungszyklen der modularen Produktfamilien. Die Wahrscheinlichkeit von Änderungen relevanter Randbedingungen, ausgelöst durch Kunden, Konkurrenten und die technologische Weiterentwicklung, steigt mit der Länge des Produktfamilienlebenszyklus, da mit dem Zeithorizont die Prognoseunsicherheit zunimmt (s. Bild2). Erschwerend kommt hinzu, dass die Prognose von Anforderungen aus dem soziokulturellen und dem Kundenumfeld für viele Unternehmen eine der größten Schwierigkeiten darstellt [5]. Wenn eine Kundenforderung bei der Entwicklung der modularen Produktfamilie nicht identifiziert wurde, steht nach dem Markteintritt mit großer Wahrscheinlichkeit keine Kombination von Modulen der Produktfamilie bereit, die das Marktsegment bedienen kann.

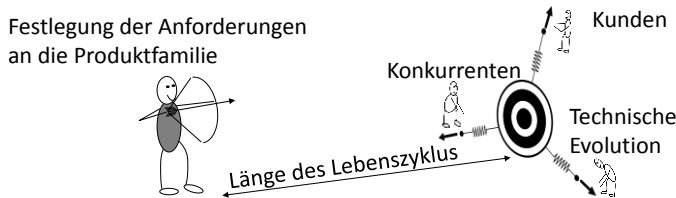


Bild 2: Herausforderungen bei der Prognose der relevanten Randbedingungen (Darstellung in Anlehnung an [6])

---

Laut dem Gestaltungsprinzip des Piecemeal Engineering nach K. Popper ist es sinnvoll, in großen und komplexen Systemen große Veränderungen, deren Auswirkungen nicht vollständig durchschaut werden können, nicht in zu großen Schritten zu vollziehen. Günstiger ist eine Realisierung in kleineren Schritten, die leichter rückgängig gemacht werden können, sofern sie sich als unzweckmäßig oder falsch erweisen [7]. Demnach kann es sinnvoll sein, dass ein Unternehmen das Produktprogramm nicht in einem Schritt auf eine modulare Produktfamilie umstellt, sondern kontinuierlich bestehende Produkte als Produktvarianten in eine modulare Produktfamilie aufnimmt. Außerdem ist es durch neue Produktvarianten möglich, Innovationen durch kleinere Veränderungen [8] innerhalb eines Produktlebenszyklus am Markt zu testen. Des Weiteren kann der Produktfamilienlebenszyklus direkt beeinflusst werden, indem z.B. durch das Hinzufügen von Produktvarianten der unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvolle Produktfamilienlebenszyklus verlängert wird.

## 2.2 Stand der Technik - Modularisierungsmethoden

Es gibt eine Vielzahl methodischer Vorgehen, um, ausgehend von technischen Abhängigkeiten oder aus produktstrategischen Gründen, Produkte modular zu strukturieren. Von den Methoden zur modularen Strukturierung von Produkten gehen nur einige auf die besonderen Herausforderungen der Entwicklung modularer Produktfamilien ein [9], indem die räumliche Varianz betrachtet wird. Die Weiterentwicklung der modularen Produktfamilie im Produktfamilienlebenszyklus wird in der Regel nur indirekt oder gar nicht betrachtet. Überwiegend wird von einer parallelen Entwicklung aller Produktvarianten ausgegangen [10].

## 2.3 Erkenntnisse aus Projekten mit der Luftfahrtindustrie

Im Folgenden werden Erkenntnisse zur Produktstrukturierung und Varianz, die in unterschiedlichen Projekten mit der Luftfahrtindustrie gewonnen wurden, vorgestellt. Die Projekte haben gemein, dass in ihnen der Integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produkte [11] verwendet wurde. Der Ansatz mit den Methodenbausteinen der variantengerechten Produktgestaltung [4] und der Lebensphasen-Modularisierung [12] ermöglicht es, bei gleichbleibend hoher externer räumlicher Vielfalt eine interne Vielfaltsreduzierung durchzuführen.

Die vorherrschenden, mehrere Jahrzehnte andauernden Produktfamilienlebenszyklen in der Luftfahrt lassen die Herausforderungen bei der Prognose von Kundenwünschen besonders deutlich hervortreten. Im Produktlebenszyklus von Flugzeugen müssen deshalb immer wieder Teilbereiche an neue An-

---

forderungen angepasst werden, weil Innovations- und Entwicklungszyklen nicht zueinanderpassen [13] oder aber die Innovationszyklen einzelner Module in einer Produktfamilie deutlich kürzer sind als die Entwicklungszyklen der Flugzeugfamilie [14]. Aufgrund der angebotenen Vielfalt ist es zudem unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zum Beispiel nicht sinnvoll, alle möglichen Kabinenvarianten auszukonstruieren. Die meisten der theoretisch möglichen Produktvarianten werden aufgrund der relativ geringen Anzahl von produzierten Flugzeugen nicht gebaut. Eine weitere aus der Zusammenarbeit mit der Luftfahrtindustrie resultierende Erkenntnis ist, dass es essentiell ist, dass während der Gestaltung beachtet wird, welche Module von der Produktentwicklung regelmäßig nach dem Markteintritt von der Produktentwicklung bearbeitet werden müssen, weil diese hohe wiederkehrende Kosten verursachen können.

Die Auswertung von Literatur sowie von Projektergebnissen hat ergeben, dass unterschiedliche und wechselnde Anforderungen an modulare Produktfamilien im Produktlebenszyklus genauer untersucht werden sollten. Im nächsten Kapitel wird deshalb darauf eingegangen, wie Bereiche einer modularen Produktfamilie innerhalb eines Produktlebenszyklus adaptiert werden können und welchen Einfluss die Produktentwicklung auf diesen Prozess hat.

### 3 Pflege modularer Produktfamilien

Im Folgenden wird ein Ansatz zur Veränderung der externen Varianz einer modularen Produktfamilie aus Sicht der Produktentwicklung beschrieben. Hierbei wird zwischen zwei Situationen, in denen die Produktentwicklung Einfluss auf die interne und externe Varianz hat, unterschieden. Es werden Strategien abgeleitet, die es ermöglichen, zukünftige Veränderungen in der modularen Produktfamilie systematisch bei der Produktgestaltung zu berücksichtigen und später effektiv und effizient durchzuführen.

#### 3.1 Situationen

Für die Pflege von modularen Produktfamilien kann makroskopisch zwischen zwei relevanten Situationen unterschieden werden (s. Bild 33). Am Anfang des Produktfamilienlebenszyklus, in der ersten Situation, wird die modulare Produktstruktur definiert und somit weitgehend festgelegt. Hierzu ist vorab einmalig Konstruktionsaufwand in größerem Umfang notwendig, so dass neue Produktfamilienlebenszyklen nur in größeren Zeitabständen wirtschaftlich vertretbar sind [2]. Die initiale Produktentwicklung kann grob mit dem Markteintritt der ersten produzierten Produktvarianten als abgeschlossen betrachtet werden.

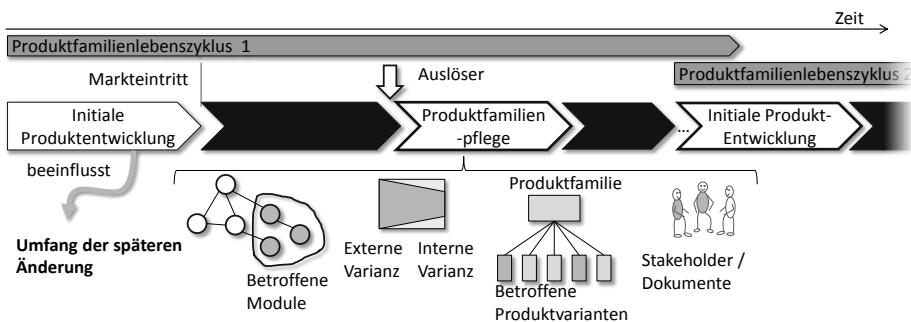


Bild 3: Situationen mit Beteiligung der Produktentwicklung

Danach, in einer zweiten Situation, kann und ggf. muss die Produktentwicklung immer wieder zur Veränderung der zuvor entwickelten modularen Produktfamilie hinzugezogen werden. Allmansberger [15] differenziert zwischen Kannänderungen und Mussänderungen. Mussänderungen müssen bei einer unzureichenden Funktionserfüllung des Entwicklungsobjekts oder zur Richtigstellung der Produktdokumentation erfolgen. Sie werden im Folgenden nicht weiter betrachtet. Der Fokus der folgenden Ausführungen liegt auf den Kannänderungen bzw. ausgelösten Änderungen [16] zur Verbesserung oder zur Adaptation der modularen Produktfamilie. Diese von Stakeholdern nach dem Markteintritt initiierten Änderungen werden im Folgenden Produktfamilienpflegemaßnahmen genannt.

Es muss beachtet werden, dass bei der Durchführung von Produktpfleßmaßnahmen große Teile der modularen Produktfamilie auskonstruiert sind. Veränderungen an existierenden Modulen können somit große Kosten verursachen, wenn viele Zeichnungen, Stücklisten, Arbeitspläne, etc. angepasst werden müssen und viele Stakeholder involviert sind.

Nach Fricke et al. [17] werden fünf allgemeine Strategien zur Handhabung von Änderungen verwendet. Das Ziel vorbeugender Strategien ist es, Änderungen zu vermeiden bzw. den Umfang von Änderungen an dem Gesamtsystem einzuschränken. Die Strategie des Frontloading zielt darauf ab, möglichst frühzeitig sich abzeichnende Veränderungen zu identifizieren, um späte und kurzfristige Änderungen zu vermeiden. Die Effektivitätsstrategie verfolgt eine gezielte Überprüfung, ob Änderungen nötig sind und Vorteile bringen, indem Aufwände gegen die resultierenden Vorteile abgewogen werden. Das Ziel der Effizienzstrategie ist es, die Parameter Zeit und Kosten der Änderung so zu beeinflussen, dass die Ressourcen bei einer Umsetzung der Änderung optimal ausgenutzt werden. Längerfristig soll die Effektivität und

Effizienz des Änderungsprozesses durch kontinuierliches Lernen aus den durchgeführten Veränderungen optimiert werden.

### 3.2 Vorbeugende Maßnahmen in der initialen Produktentwicklung

Für die vorbeugenden Maßnahmen soll der Integrierte PKT-Ansatz verwendet und durch eine stärkere Betrachtung von Anforderungen aus dem Lebenszyklus erweitert werden. Der Ansatz wird ausgehend von seinem starken Fokus auf die räumliche Varianz um Aspekte der Generationsvarianz erweitert.

Eine Prognose möglicher Änderungsauslöser im Produktlebenszyklus der modularen Produktfamilie ist nur mit der Kenntnis des Produktlebenszyklus der Familie sowie der einzelnen Produktvarianten möglich. Im ersten Schritt werden deshalb Szenarien aufgestellt, die Aussagen zu dem Lebenszyklus der gesamten modularen Produktfamilie und zu den Lebenszyklen einzelner und möglicher Produktvarianten treffen (s. Bild 4). Dies ermöglicht, die Anforderungen für die variantengerechte Produktgestaltung und Lebensphasen-Modularisierung genauer zu definieren und Wissenslücken aufzudecken. Eine frühzeitige Identifizierung von Auslösern ist wichtig, damit durch das Bündeln von Änderungen Arbeitsaufwände bezogen auf den gesamten Lebenszyklus reduziert werden, indem z.B. Dokumente weniger oft modifiziert werden müssen. Durch eine vorausschauende Änderungsantizipation ist es möglich, zukünftige Änderungsauslöser zu identifizieren und durch Frontloading die modulare Produktfamilie darauf einzustellen.

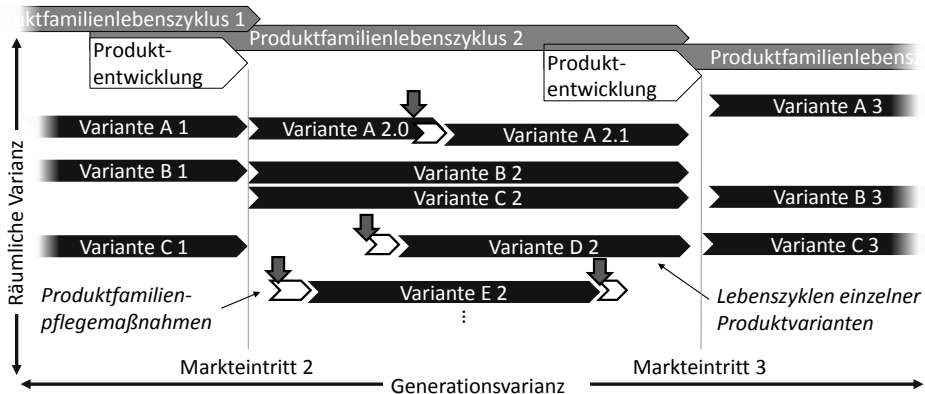


Bild 4: Beispiel Szenario

In der Regel wird es nicht möglich sein, alle Änderungsauslöser zu antizipieren. Durch das Beachten des generellen Gestaltungsprinzips einer minimalen Präjudizierung [7] sollten im Zweifelsfall Lösungen, die mehr Freiräume für weitere Entwicklungen offen lassen, gewählt werden. Von Bedeutung sind insbesondere robuste Lösungen gegenüber sich ändernden Randbedingungen, so dass sich Änderungen nur lokal auswirken. Systematisch durchgeführt werden kann eine robuste Entwicklung durch die variantengerechte Produktgestaltung [4]. Indem diese nicht nur auf die varianten Anteile der Produktfamilie angewandt wird und die Lebenszyklusszenarien beachtet werden, ist es möglich, Komponenten stärker voneinander zu entkoppeln und die Robustheit der Produktfamilie noch stärker ausprägen. Zusätzlich trägt die technisch-funktionale Modularisierung als Prozessschritt der Lebensphasenmodularisierung [12] dazu bei, entkoppelte Module zu entwickeln. Zur weiteren Analyse kann die Change Modes and Effects Analysis (CMEA) für modulare Produktfamilien adaptiert werden. Angelehnt an die Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) ermöglicht es die CMEA, die Flexibilität eines Produktes zu bestimmen [18]. Bei Strukturierung und Visualisierung sollten die besonderen Anforderungen an Anpassmodule beachtet werden [19]. Anpassmodule sollten bei der Entkopplung einen noch höheren Stellenwert erhalten und die Reduzierung auf die für den Kunden relevanten Eigenschaften eine noch höhere Priorität bekommen, damit der wiederkehrende Arbeitsaufwand beim Ausarbeiten der kundenindividuellen Lösungen minimiert wird. Im Integrierten PKT-Ansatz wird für die Darstellung von Produktfamilien bei der Modulbildung der Module Interface Graph (MIG) verwendet [11]. Sind Anpassmodule Teil des Modularenkonzepts, ist es sinnvoll, diese Module im MIG gesondert zu kennzeichnen, ähnlich wie dies z.B. mit bei den Standard Designs [20] von Harlou durchgeführt wird (s. Bild 5).

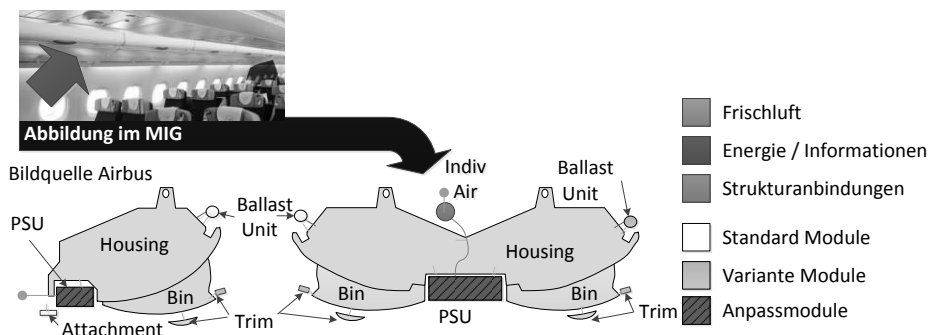


Bild 5: MIG-Visualisierung der Produktstruktur mit Anpassmodulen

### 3.3 Vorgehenskonzept für die Produktfamilienpflege

Während für die vorbeugenden Strategien auf das bestehende Vorgehen des Integrierten PKT-Ansatzes zurückgegriffen werden kann, das nur bereichsweise erweitert werden muss, muss für die Produktfamilienpflege ein solches erst entwickelt werden. Auszugehen ist bei der Pflege vom Ist-Zustand der modularen Produktfamilie, welche nach dem Markteintritt weitgehend definiert ist und in einer bestehenden Wertschöpfungskette gefertigt wird. Für die Durchführung der Produktfamilienpflege wird deshalb ein Vorgehen in den drei Phasen Vorlaufphase, Durchführungsphase und Integrationsphase vorgeschlagen (s. Bild 6), welches sich am generischen Änderungsprozess von Jarratt et al. orientiert [16].

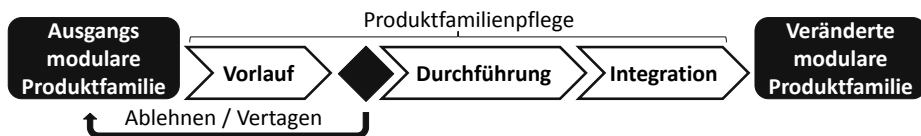


Bild 6: Vorgehenskonzept der Produktfamilienpflege

Für eine effektive und effiziente Produktfamilienpflege ist es wichtig, dass in der Vorlaufphase der Änderungsauslöser analysiert, bewertet und das eigentliche Verändern effizient vorbereitet wird. In der Durchführungsphase erfolgen die eigentlichen Änderungen von Dokumenten, Detailkonstruktionen und -abläufen. Die Integrationsphase beinhaltet die Umsetzung der Änderung in der Wertschöpfungskette. Es muss überwacht werden, ob veränderte oder neue Module sowie geänderte Prozessabläufe funktionieren und aufrechterhalten werden können.

Die Vorlaufphase steht im Folgenden bis zur Entscheidung über die Durchführung der Produktfamilienpflege im Fokus. Um die Effektivität eines Auslösers abwägen zu können, ist der Einfluss auf die gesamte Produktfamilie abzuschätzen (s. Bild 7). Es ist notwendig zu analysieren, auf welche Bereiche der modularen Struktur der Produktfamilie sich die Änderung auswirkt. Hierbei muss unterschieden werden, ob Ausprägungen einer vorhandenen Eigenschaft geändert bzw. entfernt werden, oder ob neue Eigenschaften hinzukommen. Im ersten Fall besteht bereits durch die bestehende Architektur der modularen Produktfamilien eine Zuordnung, welche Module der Produktstruktur primär betroffen sein werden. Im zweiten Fall besteht diese Zuordnung nicht und die neuen Eigenschaften müssen analysiert und Lösungskonzepte erarbeitet werden.

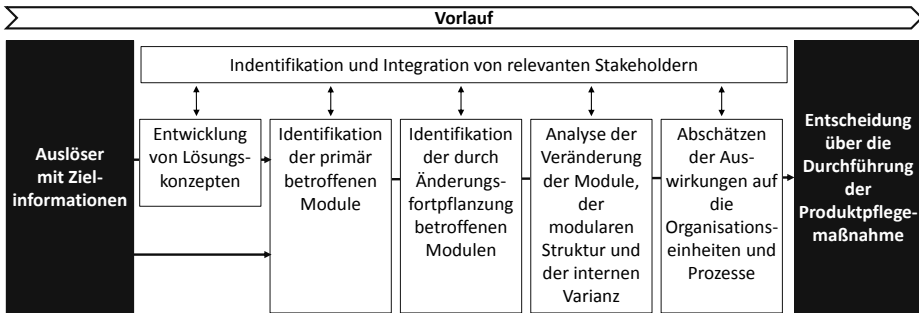


Bild 7: Detailliertes Vorgehenskonzept für die Vorlaufphase

In einem nächsten Schritt muss überprüft werden, ob sich Änderungen an den primär betroffenen Modulen auf andere Module auswirken und dort weitere Änderungen verursachen, das heißt, ob Schnittstellenspezifikationen zwischen den Modulen modifiziert werden müssen. Danach muss identifiziert werden, wie die modulare Struktur von der Änderung betroffen sein wird, um die Produktfamilie den Anforderungen entsprechend anzupassen, das heißt wie die Module verändert und ob hierzu Module entfernt, ersetzt, integriert, hinzugefügt oder aufgeteilt werden

[21]. Aus varianten Gesichtspunkten ist es von besonderer Bedeutung herauszufinden, wie sich die ausgelöste Veränderung auf der Modulebene auswirkt. Starke Varianzveränderungen von Modulen können als kritisch angenommen werden, weil mit einer hohen Wahrscheinlichkeit davon auszugehen ist, dass die bestehende Prozessebene auf diese Varianz nicht ausgelegt ist und angepasst werden muss. Wird aus einem Standardmodul ein variantes Modul, ist dies besonders kritisch, weil Skaleneffekte reduziert werden können, die Logistik umgestellt werden muss und in der Montage jetzt darauf geachtet werden muss, die richtige Modulvariante zu montieren. Basierend auf den vorherigen Schritten können organisatorische Auswirkungen eingeschätzt und betroffene Organisationseinheiten und Prozesse bestimmt werden [22]. Allgemein gilt es, frühzeitig betroffene Entwicklungsorganisationen zu integrieren, um das Vorgehen möglichst effizient durchzuführen.

Für die abschließende Bewertung müssen sowohl die einmal auftretenden Aufwände für die Veränderung als auch deren Auswirkung auf die langfristige Leistungsfähigkeit der modularen Produktfamilie betrachtet werden. Am Ende der Analyse muss eine Entscheidung getroffen werden, ob die Maßnahme durchgeführt oder auf die nächste Generation der modularen Produktfamilie verschoben bzw. verworfen werden soll.

---

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

In den vorliegenden Ausführungen wurden Gründe für die Veränderung einer in den Markt gebrachten modularen Produktfamilie dargelegt und auf Risiken hingewiesen. Erste Ansätze für die systematische Unterstützung wurden entwickelt. Makroskopisch wurde zwischen zwei unterschiedlichen Situationen für die Produktentwicklung unterschieden. Für die initialen Entwicklungen wurden existierende Strategien auf Basis des Integrierten PKT-Ansatzes genannt und Adaptionsvorschläge unterbreitet, um modulare Produktfamilien auf zukünftige Änderungsauslöser vorzubereiten. Für die eigentliche Pflege nach dem Markteintritt der modularen Produktfamilie wurde ein grobes Vorgehenskonzept entwickelt und dessen erster Schritt bis zur Entscheidungsvorbereitung detailliert. Zukünftig müssen der Ansatz weiter ausgestaltet und Handlungsempfehlungen konkretisiert werden. Zudem sollen Alternativen zur Veränderung der eigentlichen modularen Produktfamilie, wie z.B. Prozessalternativen wie ein firmeninterner Sonderbau, und die Aufwärts- und Abwärtskompatibilität von Lösungen genauer betrachtet werden.

### Literatur

- [1] Baldwin, C.Y.; Clark, K.B.: „Managing in an age of modularity“, Harvard Business Review September- Oktober, 1997, pp. 84-93.
- [2] Pahl, G; Beitz, W. et al.: „Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen“, Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [3] Martin, M. V.; Ishii, K.: „Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures“, Research in Engineering Design 13, 2002, pp. 213-235.
- [4] Kipp, T.: "Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung ", Dissertation, TuTech Verlag, Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Hamburg, 2012.
- [5] Rohrbeck, R.: „Corporate foresight“, Physica-Verlag, Heidelberg, 2011.
- [6] Wenzel, S.; Bauch, T.; Fricke, E.; Negele, H.: „Concurrent engineering and more – a systematic approach to successful product development, Proc 7th Int Symp INCOSE“, Los Angeles, 1997.
- [7] Haberfellner, R.; de Weck, O; Fricke, E.; Vössner, S.: „Systems Engineering“, Orell Füssli, Zürich, 2012.
- [8] Abernathy, W. J.; Utterback, J. M.: „Patterns of Industrial Innovation“, Technology Review June/July, 1978, pp. 40-47.

- 
- [9] Krause, D.; Ripperda, S.: „An Assessment of Methodical Approaches to Support the Development of Modular Product Families“, akzeptiert für ICED 2013, unveröffentlicht, 2013.
- [10] Boas, R.; Cameron, B.G.; Crawley, E.F.: „Divergence and Lifecycle Offsets in Product Families with Commonality“, *Systems Engineering* Vol. 16 Issue 2, 2013, pp. 175-192.
- [11] Krause, D.; Eilmus, S.: „Methodical Support for the Development of Modular Product Families“, in „The Future of Design Methodology“, London, 2011, pp. 35-45.
- [12] Bles, C.: „Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien“, TuTech Verlag, Hamburg, 2011.
- [13] Gubisch, M.: „Comfort Zone“, *Fight International* 20-26 March, 2012, pp. 36-37.
- [14] Bahns, T.; Gebhardt, N.; Krause, D.: „A modularization approach for aircraft cabin components“, 4th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST), Hamburg, 2013, pp. 201-210.
- [15] Allmansberger, G.: „Aktionsfeld 4: Strategien zum Entwickeln von Lösungsalternativen“, in „Integriertes Änderungsmanagement“, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [16] Jarratt, T.A.W.; Eckert, C.M.; Caldwell, N.H.M.; Clarkson, P.J.: „Engineering change: an overview and perspective on the literature“, *Research in Engineering Design*, Vol. 22 Issue 2, 2011, pp. 103-124.
- [17] Fricke, E.; Gebhard, B.; Negele, H.; Igenbergs, E.: „Coping with Change: Causes, Findings, and Strategies“, *Systems Engineering*, Vol. 3 No. 4, 2000, pp. 169-179.
- [18] Palani Rajan, P. K; Van Wie, M.; Campbell, M. et al.: „Design for flexibility – Measures and Guidelines“, *Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design 2003 (ICED03)*, Stockholm, 2003.
- [19] Ponn, J.; Lindemann, U.: „Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte“, Springer-Verlag, Berlin, 2011.
- [20] Harlou, U.: „Developing product families based on architectures“, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, 2006.
- [21] Kohlhase, N.; Birkhofer, H.: „Development of Modular Structures: The Prerequisite for Successful Modular Products“, *Journal of Engineering Design* Vol. 7 Nr.3, 1996, pp. 279-291.
- [22] Kleedörfer, R.: „Aktionsfeld 5: Auswirkungserfassung und Änderungsplanung“, in „Integriertes Änderungsmanagement“, Springer-Verlag, Berlin, 1998.

## Notwendigkeit von detaillierteren FE-Modellen zur Effizienzsteigerung der Produktion von Flugzeugküchen

Martin Wohlgemuth<sup>1</sup>, Patrick Spielberger<sup>1</sup>, Ralf Seemann<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *phi Engineering Services GmbH, Zweibrücker Str.35, 76829 Landau*

<sup>2</sup> *Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik TUHH*

### 1 Einleitung

Der Beitrag beschreibt die Notwendigkeit einer Optimierung des Produktentstehungsprozesses von Flugzeugküchen durch Integration der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Kosten- und Zeitreduktion sowie zur Qualitätssteigerung sowohl des Produktentwicklungsprozesses als auch des Produkts „Flugzeugküche“ selbst. Im Bereich Flugzeug-Küchen (Galley) ist der Produktentwicklungsprozess immer noch sehr stark von Versuchen am Ende der Produktentwicklungskette geprägt, d.h. die Küche wird überschlägig an Hand von Analogien ausgelegt und dann auskonstruiert. Moderne Berechnungsmethoden werden hierbei nur sehr rudimentär angewendet.

Dadurch entstehen Nachteile im Produktentstehungsprozess, wie z.B. Zeitverzögerungen durch Nichtbestehen des Endabnahmetests und ein erhöhtes Gewicht des finalen Produktes durch nachträgliche Verstärkungen der Struktur. Um diesen Nachteilen in Zukunft entgegenwirken zu können, soll der Produktentwicklungsprozess (PEP) - Entwicklung, Konstruktion und Produktion - von Flugzeugküchen optimiert werden. Hierbei wird auf FE-Berechnungsmethoden zurückgegriffen. Dazu muss eine Methodik entwickelt werden, wie die Galley-Struktur abgebildet und berechnet werden kann. Es ist

insbesondere die Vielzahl an Verbindungselementen zwischen den Bauteilen und Schnittstellen zu den Aggregaten zu betrachten und nachzubilden.

## 2 Struktureller Aufbau von Flugzeuggalleys

In der Luftfahrt werden Galleys branchentypisch in konsequenter Leichtbauweise ausgeführt. Für die Grundstruktur haben sich am Markt zwei Konzepte etabliert: Zum einen ein Rahmenaufbau aus Aluminium und zum anderen ein Flächentragwerk in Sandwichbauweise mit Wabenkern-Platten (Honeycomb-Platten). Beide Konzepte basieren auf einem ähnlichen Prinzip und bestehen im Wesentlichen aus gefügten zugeschnittenen Plattenelementen und Profilen.

Nach wie vor sind Aluminiumlegierungen eine der wichtigsten Materialien in der Luftfahrtindustrie. Der große vorhandene Erfahrungsschatz beim Auslegen sowie die moderaten Kosten machen diesen Werkstoff zu einer wettbewerbsfähigen Alternative. Weiter verbreitet am Markt ist jedoch seit geraumer Zeit die Sandwichbauweise basierend auf Faserkunststoffverbundwerkstoffen (FKV). Die Grundstruktur einer Flugzeuggalküche in Sandwichbauweise ist in Bild 1 dargestellt.

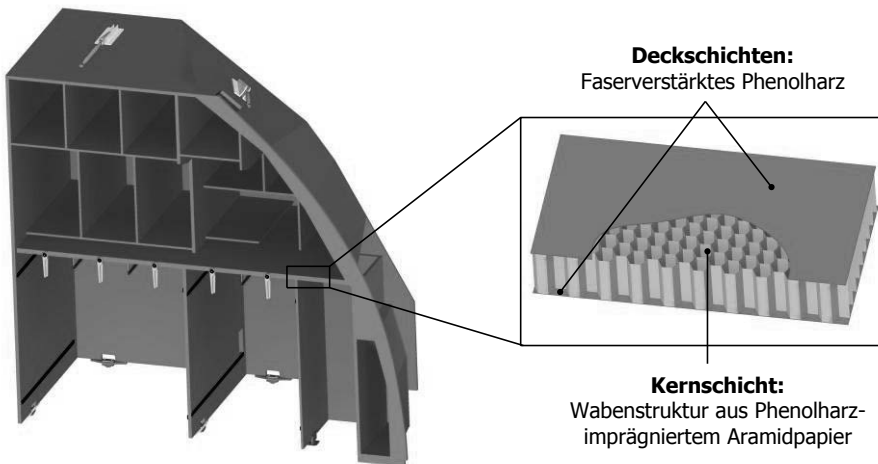


Bild 1: Grundstruktur einer Flugzeuggalküche basierend auf der Honeycomb-Sandwichbauweise

Die höhere gewichtsspezifische Steifigkeit des Materials und der damit höhere erzielbare Leichtbaugrad verschaffen diesem Konzept einen entscheidenden Vorteil. So sind Sandwichstrukturen im Flugzeuginterieur nicht nur in



Galleys sondern auch in Fußboden-, Seiten- und Deckenpaneelen sowie in Toiletten und Überkopfgepäckfächern weit verbreitet. Tatsächlich sind es üblicherweise diese Kabinensandwichstrukturen, welche bei Betrachtung des gesamten Flugzeugsystems den größten Anteil an verbauten Faserkunststoffverbundwerkstoffen ausmachen [1]. Aufgrund der höheren Relevanz der Sandwichbauweise liegt der Fokus im Folgenden auf der Auslegung und FE-Berechnung von Sandwichstrukturen.

## 2.1 Sandwichstrukturen

Bei Sandwichstrukturen handelt es sich um mehrschichtige Flächenstrukturen, welche auf dem statischen Grundprinzip des I-Trägers basieren. Die Deckschichten bestehen aus einem festen und steifen Material und nehmen als tragende Struktur des Verbundes die Zugdruckkräfte infolge von Biegung auf. Der Kern besteht aus einem Material mit kleiner spezifischer Dichte und hat die Aufgabe, die Deckschichten zu stützen und zu separieren, so dass das Flächenträgheitsmoment des Querschnittes und damit die Biegesteifigkeit des Verbundes erhöht wird. Je nach spezifischem Anwendungsfall wird dieses Prinzip in verschiedensten Materialkombinationen realisiert. Im Bereich der Kabinenmonumente für zivile Verkehrsflugzeuge werden üblicherweise langfaserverstärkte Phenolharze für die Deckschichten verwendet, während der Kern meist aus einer Honigwabenstruktur mit Phenolharz-imprägnierten Aramidfaserzellwänden besteht (Nomex® honeycomb). Diese Materialkombination zeichnet sich nicht nur durch eine hervorragende gewichtsspezifische Festigkeit und Steifigkeit, sondern auch durch eine sehr gute Feuerresistenz aus [2].

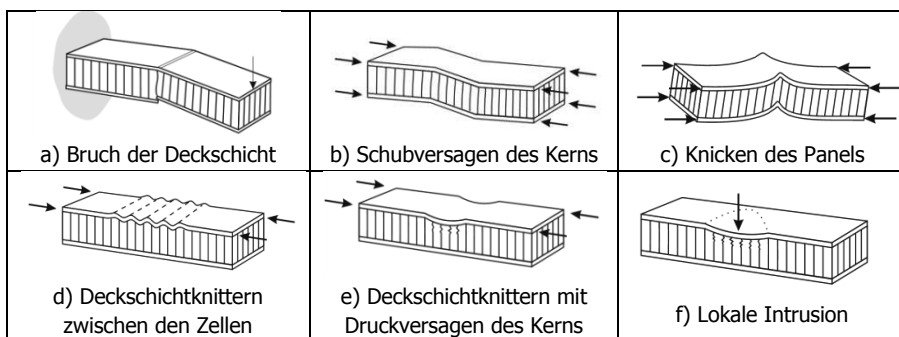


Bild 2: Verschiedene Versagensformen von Sandwichstrukturen [3]

Die Summe aus inhomogenen anisotropen Konstituentenmaterialien und strukturiertem Wabenkern führen zu einem insgesamt komplexen Versagens-

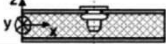


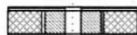

verhalten des Verbundes. Bild2 zeigt exemplarisch einige typische Versagensformen, welche je nach Lastfall bei der Auslegung von Honigwaben-Sandwichstrukturen berücksichtigt werden müssen. Aufgrund ihrer weiten Verbreitung in der Luft- und Raumfahrt ist das strukturmechanische Verhalten von Honeycomb-Sandwichpanels umfassend in der Literatur beschrieben. Als Resultat sind etablierte analytische und numerische Berechnungsregeln für die globale Auslegung der Panels vorhanden.

Wie bei anderen zusammengesetzten Strukturen auch, liegt die Schwierigkeit bei der Auslegung und Strukturberechnung jedoch in der strukturmechanisch korrekten Abbildung der eingesetzten Verbindungstechnik an den internen und externen Schnittstellen der Gesamtstruktur. Dies trifft in besonderem Maße auf Sandwichstrukturen zu. Im Folgenden wird daher noch einmal näher auf die Verbindungstechnik bei Sandwichstrukturen eingegangen.

## 2.2 Verbindungstechnik bei Sandwichstrukturen

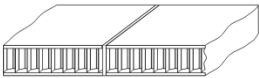
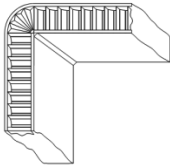
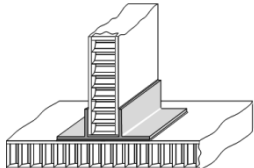
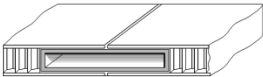
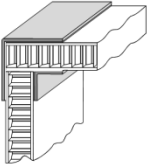
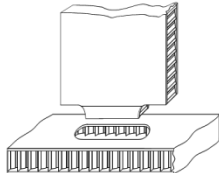
Das Sandwichprinzip ist aufgrund der geringen Festigkeit der Kernschicht generell nicht für lokale Kräfteinleitungen geeignet. Da es sich aus praktischen Gründen jedoch häufig nicht vermeiden lässt lokal Kräfte einzuleiten, werden die Panels bei Bedarf örtlich verstärkt. Diese lokalen Verstärkungen werden allgemein unter dem Begriff "Inserts" zusammengefasst und können je nach Anwendungsfall verschiedenste Formen annehmen [2].

Tabelle 1: Verschiedene Inserttypen mit Bewertung von Eignung für Kraft/Momentaufnahme und Fertigungsaufwand [4]

Gestaltungskonzept	Eignung für			Fertigungsaufwand
	$F_x / F_y$	$F_z$	$M_y$	
Nieten in der Deckschicht 	+	-	---	sehr gering
Aufgeklebte Inserts 	+	+	--	gering
Nachträglich eingegossene Inserts 	++	+	-	mittel bis hoch
In die Kernschicht integrierte Inserts 	+++	+++	+++	hoch bis sehr hoch
Zusammengeführte Deckschichten 	++	+++	++	hoch bis sehr hoch

Aufgrund der durch die Inserts eingebrachten strukturellen Diskontinuitäten geht das Versagen der Gesamtstruktur häufig von diesen lokalen Krafterleitungspunkten aus, während analog zum reinen Sandwichpanel komplizierte Versagensmodi auftreten. Tabelle1 zeigt exemplarisch einige gängige Insertertypen. Neben Inserts sind auch die Verbindungen zwischen den einzelnen Sandwichplattenelementen der Gesamtstruktur versagenskritisch. Flugzeuggalleys zeichnen sich durch eine Vielzahl von T- und Eck-Verbindungen aus, wobei auch stirnseitige Verbindungen vorkommen. Analog zu den Inserts gibt es unzählige von konstruktiven Lösungen zur Umsetzung dieser Verbindungen. Tabelle2 zeigt einen kleinen Auszug von typischen Verbindungstechniken.

Tabelle 2: Verschiedene Sandwichplattenverbindungen [5]

Stirnseitige Verbindung	Eckverbindung	T-Verbindung
 <p>Einfach geklebt</p>	 <p>„Cut and fold“</p>	 <p>Gestützt durch spezielle Profile</p>
 <p>Gestützt durch internes Profil</p>	 <p>Gestützt durch aufgeklebte L-Profile</p>	 <p>Nut-Feder</p>

In der Literatur finden sich einige Studien zum strukturmechanischen Verhalten spezifischer Sandwichverbindungstechniken, während sich diese Studien auf einige wenige Insert/Plattenverbindungstypen konzentrieren [6-8]. Hervorzuheben sind jedoch die Arbeiten von Heimbs [9,10], welche das strukturmechanische Verhalten verschiedener Honeycomb-Sandwichverbindungen nicht nur in Versuch und Simulation charakterisieren, sondern die Ergebnisse auch in Form von vereinfachten Elementen in ein globales FE-Model eines Flugzeugkabinen-Hatracks überführen. Beim Studium der vorhandenen Literatur wird außerdem deutlich, dass sich jeder individuelle Verbindungstyp strukturmechanisch anders verhält, wodurch vorhandene Kenntnisse über eine Verbindung nur bedingt übertragbar sind.

---

### 3 FE-Berechnung im Entwicklungsprozess von Galleys

Moderne Berechnungsmethoden, wie z.B. die Finite Elemente Methode (FEM), werden nur am Rande der Galley-Konstruktion eingesetzt. Am Ende der Produktentwicklungskette stehen Versuche an ersten Serienprodukten (vgl. Bild 3). Anhand dieser Versuche wird die Küche hinsichtlich ihrer Stabilität bewertet und gegebenenfalls verbessert. Diese Untersuchungen zu einem so späten Zeitpunkt des PEP führen zu drei wesentlichen Phänomenen:

- Die Galley wird vom Entwickler meist zu massiv, d.h. zu schwer ausgelegt, weil ihm in der frühen Produktentwicklungsphase keine Daten zur Lage und zum Betrag der höchsten Lasten zur Verfügung stehen.
- Schwachstellen, die während des Statiktests zu Festigkeitsproblemen führen, werden durch Aufbringen einfacher Bleche und Profile verstärkt. Dies geschieht jedoch auf Erfahrungswerten ohne detaillierte Kenntnisse, wie stark die Bleche oder Profile ausgeführt sein müssen, um den Statik-Anforderungen unter Berücksichtigung einer Gewichtsoptimierung gerecht zu werden. Die Folge ist im ungünstigsten Fall, dass die Galley weniger Nutzlast als spezifiziert aufnehmen kann, mit direkten Nutzungseinschränkungen für den Kunden.
- Das Versagen der Struktur im Statiktest durch ungenügende konstruktionsbegleitende Berechnungsmethoden und die anschließenden manuellen Optimierungsschleifen an der Hardware führen zu erheblichen kostenintensiven Unterbrechungen und Verzögerungen im Produktionsprozess.

Im Bereich der Flugzeugküchen kommt die FE-Berechnung in den frühen Produktentwicklungsphasen lediglich zur Berechnung von übertragenen Kräften von der Küchenstruktur in die Flugzeugstruktur sowie zum Abschluss des Konstruktionsprozesses zur statischen Berechnung der Verformungen zum Einsatz. Um eine effiziente FE-Berechnung zu ermöglichen, werden derzeit sehr starke Vereinfachungen getroffen, die es lediglich erlauben, erste Tendenzen abzuleiten, ob eine Küche den statischen Test besteht oder nicht. Für die Berechnung der übertragenen Kräfte von der Küche auf die Flugzeugstruktur sind diese Vereinfachungen hingegen zulässig, da lokale Spannungen nicht von Belang sind. Studien- und Diplomarbeiten haben gezeigt, dass viele Vereinfachungen, die beim Modellieren zurzeit vorgenommen werden, die Ergebnisse der lokalen Spannungen deutlich beeinflussen. So werden im Modell die Verbindungen zwischen zwei Platten/Elementen nicht durch Verbindungselemente abgebildet, sondern ideal steif verbunden. Dies führt zu

einer gegenüber dem realen Bauteil nicht vorhandenen deutlichen Versteifung der Struktur, insbesondere im Bereich der Verbindungselemente (vgl. Bild 4).

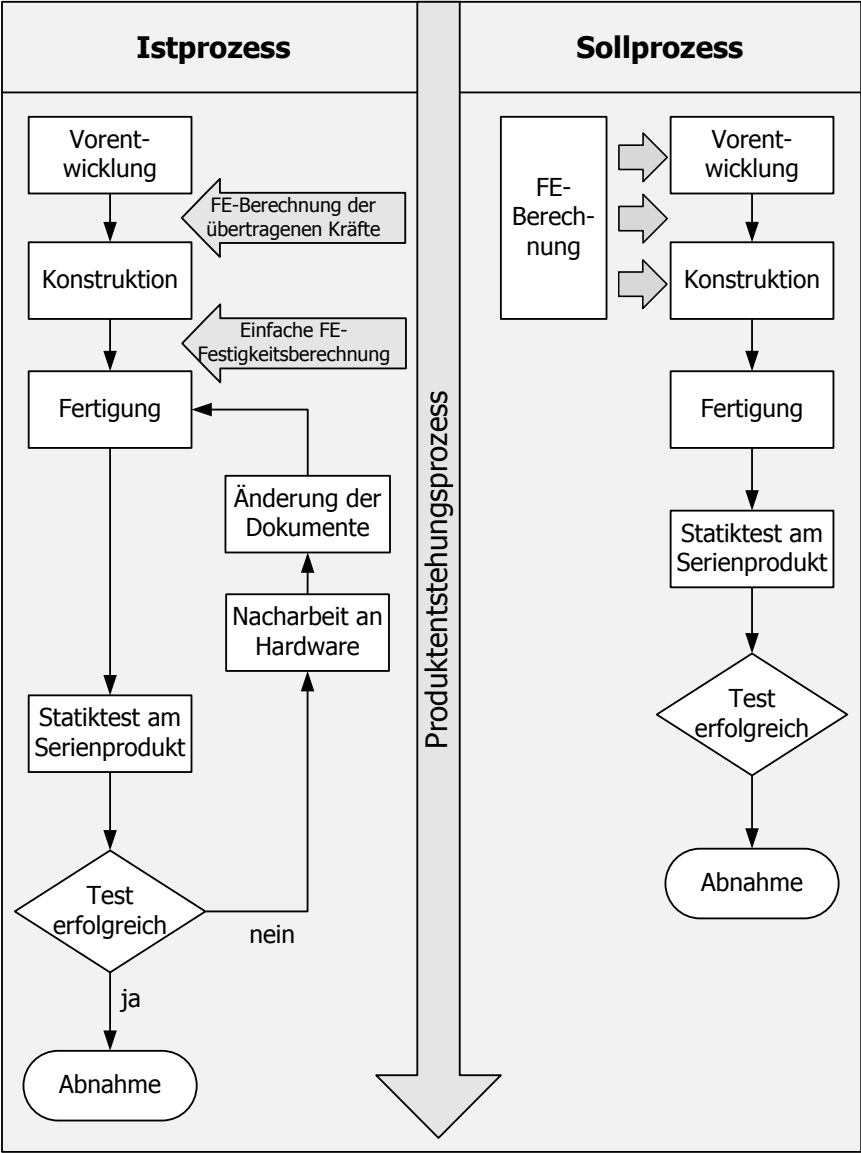


Bild 3: Soll-Ist-Vergleich beim Produktentstehungsprozess von Galleys

---

Das Versagen der Struktur in realen statischen Tests zeigt jedoch, dass der Schaden meistens gerade in diesen Bereichen stattfindet. Daraus folgt die Notwendigkeit, Verbindungselemente im Modell exakter abzubilden. Aus folgenden Gründen wird darauf zurzeit noch verzichtet:

- Die große Zahl der zu berücksichtigenden Verbindungselemente mit ihren Kontaktbedingungen führt zu einem sehr großen Vernetzungs- und Berechnungsaufwand, der mittels heutiger Methoden und Softwarelösungen konstruktionsbegleitend nicht effizient umsetzbar ist.
- Um die Verbindungselemente in das Berechnungsmodell zu implementieren, ist ein vereinfachtes Ersatzmodell notwendig. Es steht keine Methodik zur Verfügung, die diesen Prozess abbildet.
- Ein weiteres zentrales Problem ist das Fehlen von Messergebnissen zur Validierung der FE-Berechnungen.

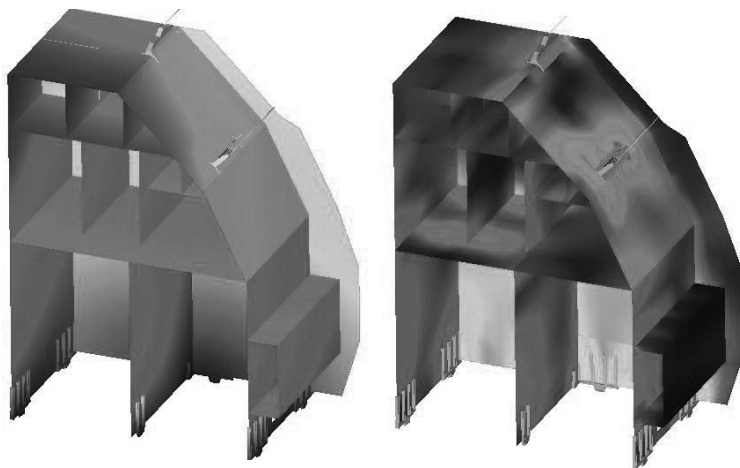


Bild 4: Links das Verformungs- und rechts das Spannungsergebnis einer Galley-FE-Berechnung

Durch gezielte FE-Berechnungen könnte die statische Lastverteilung in der Struktur visualisiert werden und dem Konstrukteur zur Optimierung der Struktur zur Verfügung stehen. Damit wäre eine erheblich sicherere Erreichung des spezifizierten Gewichts und eine signifikante Kosten- und Zeitersparnis während des Produktentwicklungsprozesses realisierbar. Einerseits besteht das Flugzeug selbst aus High-Tech-Komponenten, in denen jahrzehntelange Forschungs- und Entwicklungsarbeit steckt, um vor allem dort einen hohen Grad an Leichtbau zu erzeugen. Andererseits werden die Interieurkomponenten,



---

wie bspw. Flugzeugküchen sehr rudimentär entwickelt, wodurch Gewichts- und Strukturoptimierungen betrachtet auf die Gesamtbaugruppe „Flugzeug“ nicht effizient genutzt werden.

Weiterhin können die Modelle zur statischen Berechnung als Grundlage für darauf aufbauende dynamische Auslegungen wie zum Beispiel für den Windmilling-Lastfall (Sustained Engine Imbalance) herangezogen werden. Dieser Lastfall gewinnt durch die größer werdenden Turbinen im Flugzeugbau und damit im Schadensfall größeren Unwuchten immer mehr an Bedeutung. Im Gegensatz zu den statischen Berechnungen gibt es hier noch sehr wenig Erfahrungswissen, dies führt zu einer weiteren Überdimensionierung der Kabinenmonumente. Zur versuchsseitigen Untersuchung dieses Phänomens wurde erstmals an der TU Hamburg-Harburg ein neues Prüffeld aufgebaut. Hier ist es möglich, komplette Monumente unter Schwingungsanregung zu untersuchen. Mit Hilfe der Ergebnisse dieses Prüfstandes kann es gelingen, hinreichend genaue valide FE-Simulationsmodelle aufzubauen und zu überprüfen.

#### 4 Lösungsansatz und Ausblick

Der Lösungsweg sieht einen stufenweisen Ausbau des Detaillierungsgrades vom heutigen Stand aus vor. Hierbei ist wichtig, dass alle Ergebnisse validiert werden, um entsprechende Akzeptanz zu erreichen. Zunächst sollen hierzu Einzelmodelle von Verbindungstypen parametrisiert aufgebaut und anschließend mit Versuchsergebnissen abgeglichen werden. Um später im Gesamtmodell Rechenzeit zu sparen, soll schon hier überprüft werden, welche Parameter das Berechnungsergebnis und die Rechenzeit in welcher Form beeinflussen. Mit Abschluss dieser Arbeiten sollen validierte rechenzeitoptimierte Modelle der einzelnen Verbindungstypen zur Verfügung stehen. Hierzu muss eine Methodik entwickelt werden, wie neue am Markt aufkommende Verbindungstypen mit möglichst wenig Versuchsaufwand charakterisiert und in die Modellstruktur überführt werden können. Wenn die Einzelmodelle der Verbindungselementtypen validiert sind, werden diese schrittweise in das Gesamtmodell integriert. Hierbei soll ein weiteres methodisches Vorgehen erarbeitet werden, wie das Gesamtmodell aus einer Art Bibliothek aufgebaut werden kann. Nach einer Validierung kann das Gesamtmodell nun mit den entsprechenden Lastkollektiven belastet werden und dient zur endgültigen Bewertung der Küchenstruktur hinsichtlich der Erfüllung der Anforderung aus dem Zertifizierungsprozess.

Die detaillierten Gesamtmodelle können ferner für zurzeit nicht zugängliche Schwingungsanalysen der Monumentstruktur zu einem deutlich früheren Produktentstehungszeitpunkt verwendet werden. Dazu ist ein Abgleich der

---

Simulationsergebnisse mit Ergebnissen vom Schwingungsdynamikprüfstand notwendig. Die Schwingungsanalyse kann weiteres Optimierungspotenzial der Monumente aufzeigen.

Nachdem die phi Engineering Services GmbH und das Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik der TUHH die aufgezeigten Defizite festgestellt und analysiert haben, sollen diese in einem Projekt der Kooperationspartner anhand des aufgezeigten Lösungsansatzes umgesetzt werden.

## Literatur

- [1] Red C.: Composites in Aircraft Interiors, 2012-2022, In: High-Performance Composites, Verlag: Gardner Business Media Inc., September 2012
- [2] Zenkert D.: The Handbook of Sandwich Construction, EMAS Ltd., Worcestershire UK, 1997
- [3] HexWeb™ Honeycomb Sandwich Design Technology, Publication No. AGU 075b, Hexcel Corporation, Duxford UK, 2000
- [4] Roth, M.A. et. al.: Entwicklung von in Dickenrichtung armierten Krafteinleitungen für Sandwich-Strukturen aus Faser-Kunststoff-Verbund, Konstruktion - Ausgabe 5-2005, S. 81-85
- [5] Sandwich Panel Fabrication Technology, Publication No. LTU 018, Hexcel Corporation, Duxford UK, 2001
- [6] Song KI, Choi JY, Kweon JH, Choi JH, Kim KS. An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures. *Composite Structures* 2008; 86:107–113.
- [7] Yeh HY, Nguyen SV, Yeh HL. Failure analyses of polymer matrix composite (PMC) honeycomb sandwich joint panels. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2004; 23:923–39
- [8] Theotokoglou EE; Moan T.: Experimental and numerical study of composite T-joints. *Journal of Composite Materials*, 1996; Vol. 30
- [9] Heimbs S. et. al.: Numerical simulation of aircraft interior components under crash loads, In: *International Journal of Crashworthiness* Vol. 13, No. 5, 2008
- [10] Heimbs S. et. al.: Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts, In: *Journal of Composite Structures* 89, 2009

## **Evaluierung unterschiedlicher Theorien zur Berechnung beanspruchungsgerechter Faserorientierungen in CFK-Strukturen**

Daniel Klein, Steffen Caballero, Sandro Wartzack  
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

A Young's Modulus of up to 100 GPa, high strength and low density are only a few features that make carbon fibre reinforced plastic (CFRP) an ideal material for lightweight constructions. But the potential of CFRP can only be exploited if the fibres are oriented correctly. Therefore, two different theories to compute the ideal fibre orientation within structures made of CFRP are introduced. One is the load path theory developed by KELLY who originally wanted to visualize loadpaths within structures and the other is the CAIO method which imitates the adaptive growth of trees. After a short comparison of these different theories with the help of Mohr's circle the fibre orientation within a b-pillar is computed according to both theories and evaluated with respect to its mechanical behaviour.

### **1 Möglichkeiten und Herausforderungen kohlefaserverstärkter Kunststoffe als Konstruktionswerkstoff**

Bereits seit vielen Jahren wächst der Markt für kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) rasant an. Gemessen am Gesamtgewicht des umgesetzten Werkstoffs wuchs der Markt von 24.000 t im Jahre 2009 auf 42.000 t im Jahre 2012 an und für das Jahr 2015 wird ein weiterer Anstieg auf 73.000 t prognostiziert [1]. Zurückzuführen ist ein derartiges Wachstum vor allem auf die herausragenden Eigenschaften von CFK, wie etwa die hohen Festigkeits- und Steifigkeitswerte bei nur geringer Dichte, die Produktentwicklern ein be-

sonders hohes Leichtbaupotential versprechen [2]. Doch trotz dieses rasanten Wachstums ist ein flächendeckender Einsatz in Serienprodukten in naher Zukunft nicht zu erwarten. Experten schätzen den Anteil von CFK am Markt der Automobilwerkstoffe im Jahr 2030 auf maximal 0,5 % [3]. Die Gründe für diesen vergleichsweise niedrigen Anteil am Markt sind vielschichtig und reichen von zu hohen Werkstoffkosten – der CFK Preis beträgt derzeit etwa 570 % des Stahlpreises [4] – bis hin zu hohen Zykluszeiten, die zusammen den Einsatz in Serienprodukten unrentabel machen [5]. Vor allem aber auch die unzureichende Ausnutzung des strukturmechanischen Potentials schränkt den weitreichenden Einsatz von CFK-Werkstoffen ein [6], denn nur wenn CFK-Bauteile werkstoff- bzw. beanspruchungsgerecht ausgelegt werden, kann das gesamte mechanische Potential ausgenutzt werden. Und nur so sind auch die höheren Kosten gegenüber anderen Leichtbauwerkstoffen recht zu fertigen.

### 1.1 Abhängigkeit der relativen Steifigkeit von der Faserorientierung bei faserverstärkten Kunststoffen

Wie erheblich die mechanischen Eigenschaften faserverstärkter Kunststoffe von einer beanspruchungsgerechten Faserorientierung abhängen, kann anhand einer Rechnung gezeigt werden.

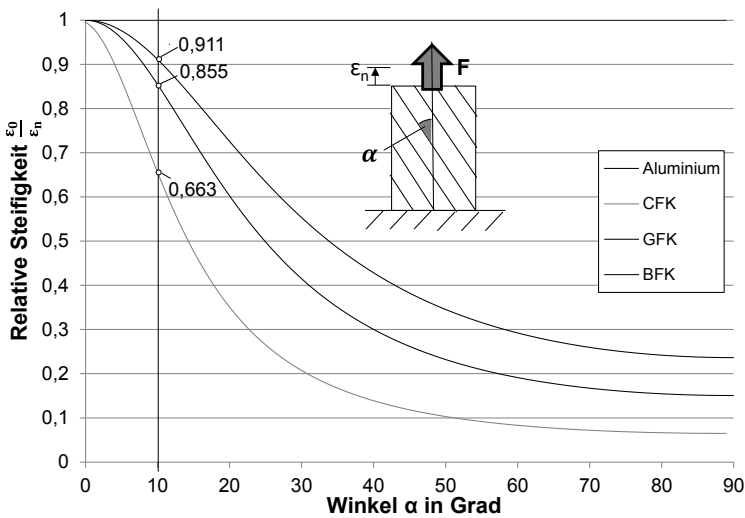


Bild 1: Abhängigkeit der relativen Steifigkeit von der Beanspruchungsrichtung

In Bild1 ist die relative Steifigkeit in Bezug zur Abweichung von der beanspruchungsgerechten Faserorientierung (= Winkel  $\alpha$ ) für Aluminium, kohlefaserverstärkte (CFK), glasfaserverstärkte (GFK) und basaltfaserverstärkte (BFK) Kunststoffe angegeben. Um zu dieser Darstellung zu gelangen, wurde eine ebene Platte angenommen, die auf der einen Seite fest eingespannt ist und auf der anderen Seite mit der Kraft  $F$  belastet wird. Die Faserorientierung und die Belastungsachse nehmen zu Beginn den Winkel  $\alpha=0$  ein. Damit lässt sich über die Laminattheorie die anfängliche Verzerrung  $\varepsilon_0$  errechnen, die die minimal erreichbare Verzerrung bei idealer Faserorientierung in Richtung der Kraftachse kennzeichnet. Mit zunehmender Abweichung der Faserorientierung von der Kraftachse (=Winkel  $\alpha$ ) können auch zunehmende Verzerrungen  $\varepsilon_n$  errechnet werden, die -über den Quotienten  $\varepsilon_0/\varepsilon_n$  in Bezug gesetzt- die relative Steifigkeit ergeben. Die resultierenden Graphen lassen deutlich erkennen, dass bei allen untersuchten faserverstärkten Kunststoffen bereits bei einer Abweichung von nur  $10^\circ$  von der idealen Faserorientierung mit erheblichen Einbußen in der relativen Steifigkeit zu rechnen ist. Ab  $45^\circ$  Abweichung fallen die relativen Steifigkeiten der Werkstoffe zum Teil sogar auf unter 30 % der Ausgangssteifigkeit. Die Einflussgrößen auf den Verlauf der relativen Steifigkeit  $S$  lassen sich identifizieren, wenn auf Basis der Laminattheorie eine analytische Funktion in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$  und den Materialkennwerten  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$  formuliert wird:

$$(1) \quad S = \frac{1-\nu_{12}}{\cos^2(\alpha) + \frac{E_1 \sin^2(\alpha)}{E_2} - \nu_{12}(\cos^6(\alpha) + \sin^6(\alpha) + 3 \sin^2(\alpha) \cdot \cos^2(\alpha))}$$

Es stellt sich heraus, dass für den Verlauf der relativen Steifigkeit  $S$  des Laminats vor allem die Querkontraktionszahl  $\nu_{12}$  sowie das Verhältnis des E-Moduls der Faserrichtung  $E_1$  zum E-Modul der Matrix  $E_2$  entscheidend ist und bei der Wahl des geeigneten Werkstoffs bei Leichtbaukonstruktionen beachtet werden muss. Mit den errechneten Graphen lässt sich eindeutig zeigen, dass eine Ausnutzung des Leichtbaupotentials faserverstärkter Kunststoffe nur mit der Definition einer beanspruchungsgerechten Faserorientierung möglich ist. Doch gerade bei komplexen Geometrien und Lastfällen ist die Bestimmung der idealen Faserorientierung nicht mehr so einfach möglich wie bei der ebenen Platte. Hier müssen rechnerunterstützte Verfahren zum Einsatz kommen. In der Literatur existieren hierzu zwei unterschiedliche Ansätze, die beide eine „Auslegung nach dem Kraftfluss“ erlauben sollen, die aber besonders im Bereich ausgeprägter Schubspannungen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Diese werden im Folgenden vorgestellt und miteinander verglichen.

## 2 Errechnung der beanspruchungsgerechten Faserorientierung nach dem Vorbild der Natur

Bereits seit einigen Jahrzehnten versuchen Ingenieure und Naturwissenschaftler technische Produkte anhand biologischer Funktionsprinzipien zu optimieren. Es werden dabei zwei unterschiedliche Herangehensweisen unterschieden. Einerseits können direkt Analogien in der Natur für die technische Problemstellung gesucht werden, andererseits können auch Funktionsprinzipien abstrahiert und auf technische Produkte übertragen werden, wie etwa der bekannte Lotusblüten-Effekt [7]. Auch für die Problemstellung der Entwicklung einer beanspruchungsgerechten Faserorientierung lassen sich Analogien in der Natur finden, die von Mattheck et al. (z. B. in [8] und [9]) abstrahiert und exemplarisch in [10] in einem Algorithmus implementiert wurden. Dabei konnte gezeigt werden, dass sowohl Knochen- als auch Baumstrukturen nach demselben Vorbild optimiert werden.

### 2.1 Natürliche Vorbilder: Knochen- und Baumwachstum

Ähnlich wie Faserverbundwerkstoffe hat auch Holz die guten mechanischen Eigenschaften seinem Faseraufbau zu verdanken. Doch im Gegensatz zu Faserverbundwerkstoffen handelt es sich bei Holz um einen natürlichen Werkstoff, der sich im Laufe der Zeit entsprechend seiner Belastungen verändert. Bei genauer Betrachtung der Faserverläufe an Ästen zeigt sich, dass Bäume die Fasern nach und nach in Richtung der Hauptspannungstrajektorien ausrichten, um eine schubspannungsfreie Faserausrichtung zu erhalten [8-10]. In Bild 2 ist dies anhand eines eingewachsenen Asts gezeigt.

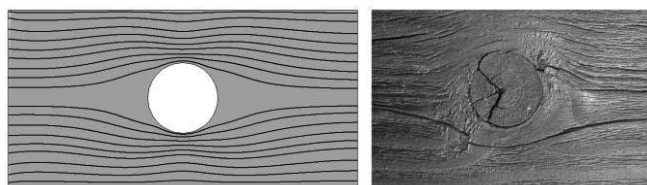


Bild 2: Verlauf der errechneten Hauptspannungslinien (links) mit dem Faserverlauf bei einem eingewachsenen Ast (rechts)

In der linken Hälfte ist der errechnete Faserverlauf einer Lochplatte unter Zugbeanspruchung dargestellt. Werden die Hauptspannungslinien als Stromlinien visualisiert, so ergibt sich derselbe Faserverlauf wie bei einem eingewachsenen Ast, der auch einem Zugbeanspruchungszustand unterliegt. Die-



selbe Wachstumsregel lässt sich auch beim Knochen erkennen, bei dem die schwammartige Knochenstruktur (Spongiosa), die den Knochen im Inneren ausfüllt, entlang der Hauptspannungstrajektorien orientiert ist [8][14]. In 3 ist dies am Beispiel des Oberschenkelknochens (Femur) im Bereich des Gelenks gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Spongiosa entlang der Hauptspannungstrajektorien wächst, um eine maximale Belastbarkeit bei möglichst geringem Gewicht zu erhalten.

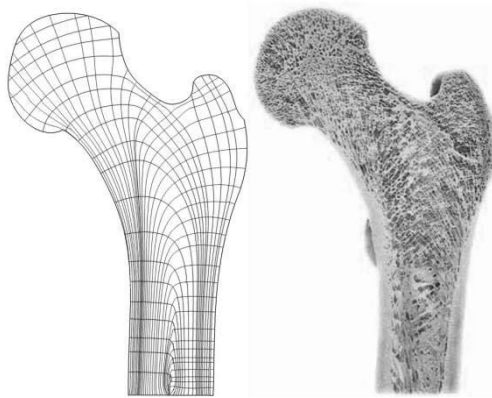


Bild 3: Vergleich der errechneten Hauptspannungstrajektorien (links) mit dem Längsschnitt eines menschlichen Femur-Knochens (rechts, [18])

## 2.2 Die CAIO-Methode

Auf Basis der Erkenntnis, dass sowohl Bäume als auch Knochen die Fasern bzw. die innere Struktur entlang der Hauptspannungstrajektorien ausrichten, wurde in [10] die sogenannte CAIO (Computer Aided Internal Optimization)-Methode entwickelt und in [12] auf 3D-Anwendungen erweitert.

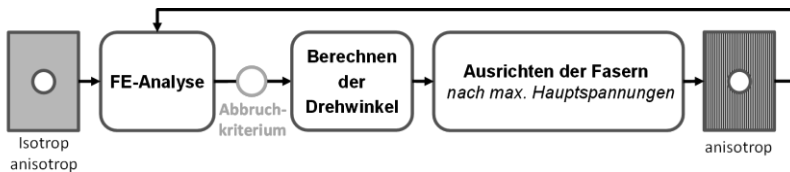


Bild 4: Ablauf des Algorithmus auf Basis der CAIO-Methode (nach [12])

Die CAIO-Methode sieht eine iterative Orientierung der Fasern in Richtung der Hauptspannungstrajektorien vor, um wie bei den natürlichen Vorbildern,

sukzessive die Schubspannungsbelastung der Fasern im Bauteil zu minimieren. In Bild 4 ist der Ablauf des Algorithmus exemplarisch dargestellt, der im Rahmen dieses Beitrags implementiert wurde und sich auf die in [12] gezeigte CAIO-Methode stützt. Zunächst wird ein FE-Modell erstellt, das die Einbaubedingungen widerspiegelt und dessen Materialmodell zunächst isotrop als auch anisotrop sein kann. Nach einer FE-Analyse werden die Hauptspannungstrajektorien für jedes Element berechnet und die Winkelabweichung zwischen x-Richtung des jeweiligen Elementkoordinatensystems, die die Faserrichtung darstellt, und der im Element betragsmäßig maximalen Hauptspannung bzw. Hauptspannungstrajektorie ermittelt. Dieser Winkel stellt den Drehwinkel dar, um den das jeweilige Elementkoordinatensystem gedreht werden muss, damit die Faser in Hauptspannungsrichtung zeigt. Spätestens an dieser Stelle muss nun ein anisotropes Materialmodell vergeben werden, bevor eine weitere Iteration beginnen kann. Der Algorithmus läuft dabei so lange ab, bis die faserbezogenen Schubspannungen sich nicht weiter reduzieren. Ergebnis ist eine Faserorientierung im Bauteil, wie sie in Knochen oder Bäumen beobachtet werden kann. In zahlreichen Publikationen (z. B. in [9] und [12]) wird dies als eine Ausrichtung nach dem Kraftfluss bezeichnet. In der Literatur existiert allerdings ein weiterer Ansatz, der eine kraftflussgerechte Auslegung ermöglichen soll, der aber auf einem anderen theoretischen Fundament aufbaut. Dies wird im Folgenden gezeigt.

### 3 Die Kraftflusstheorie nach Kelly

Die ursprüngliche Intention von Kelly war es, eine Möglichkeit zu schaffen Kraftflüsse in mechanisch beanspruchten Strukturen zu visualisieren. Basis seiner Theorie ist die Annahme, dass es in belasteten Strukturen einen Gleichgewichtszustand zwischen den äußeren Belastungen  $F_a$  und  $F_b$  sowie der Strukturantwort in Form der Spannungen  $\sigma_n$  und  $\tau_{nt}$  gibt (siehe Bild 5 5). Dieser Gleichgewichtszustand muss auch entlang einer Kraftflusslinie existieren.

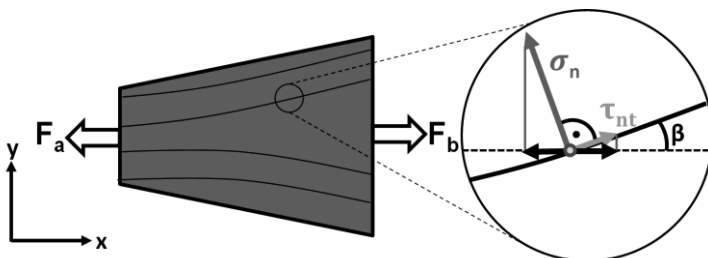


Bild 5: Annahmen zu Kraftflusstheorie nach Kelly



Wird das Gleichgewicht entlang einer Kraftflusslinie mathematisch formuliert und direkt die Projektionen von  $\sigma_n$  und  $\tau_{nt}$  eingesetzt, ergibt sich

$$(2) \quad \sigma_n \sin \beta = \tau_{nt} \cos \beta$$

Diese Gleichung kann wiederum über die Spannungen im globalen Koordinatensystem beschrieben und so eine Möglichkeit geschaffen werden, den Winkel  $\beta$  über eine iterative Lösung innerhalb einer FE-Berechnung zu finden (siehe hierzu [13]). Da diese Vorgehensweise allerdings einen großen Rechenaufwand nach sich zieht, weil für jedes Element der Winkel  $\beta$  iterativ errechnet werden muss, wurde in [16] eine Möglichkeit aufgezeigt, die es ermöglicht, die Kraftflussvektoren direkt aus den Ergebnissen einer FE-Berechnung zu bestimmen. Demnach ergeben sich die Kraftflussvektoren zu

$$(3) \quad \vec{B}_x = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad \vec{B}_y = \begin{bmatrix} \tau_{xy} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{zy} \end{bmatrix} \quad \vec{B}_z = \begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

und stellen damit lediglich die einzelnen Spalten des Spannungstensors dar. Dieser kann vom Benutzer vergleichsweise einfach aus einer FE-Rechnung ausgelesen und so für jede Raumrichtung der Kraftflussvektor konstruiert werden. Dies ist in Bild 6 exemplarisch für den x-Kraftfluss eines Schalen-Elements gezeigt.

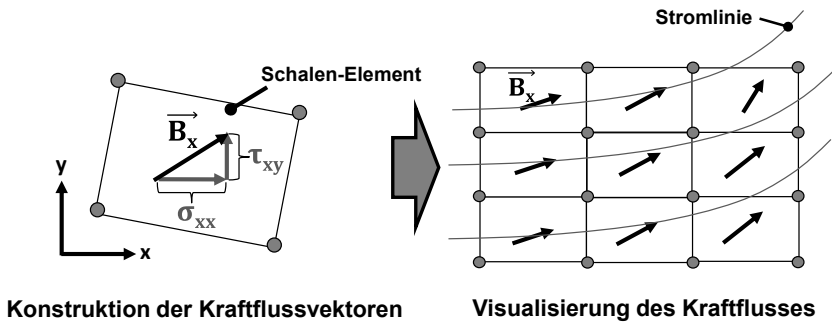


Bild 6: Visualisierung des Kraftflusses auf Basis der Kraftflussvektoren [17]

Anhand dieser Kraftflussvektoren nach Kelly wird es möglich, die Faserverläufe in CFK-Strukturen zu bestimmen. Es sei aber bereits an dieser Stelle auf einen erheblichen konzeptionellen Nachteil der Kraftflusstheorie hingewiesen. Da sich die Theorie auf die Spannungen im globalen Koordinatensystem stützt (siehe Gleichung (3)), sind die Kraftflussvektoren koordinatenvariant,

da auch der Spannungstensor im globalen Koordinatensystem koordinatenvariant ist. Dies bedeutet, dass sich bei einer Rotation der Elemente bzw. des Bauteils im Koordinatensystem die Kraftflussvektoren ändern. Zudem ergeben sich bei drei möglichen Koordinatenachsen für jedes Element drei unterschiedliche Kraftflüsse. Welche Kraftflussrichtung jedoch die Entscheidende ist, muss vom Produktentwickler festgelegt werden [17].

#### 4 Vergleich der Theorien am Mohr'schen Spannungskreis

Obwohl sich die nach CAIO-Methode und Kraftflusstheorie errechneten Faserverläufe in einigen Bereichen erheblich unterscheiden, sprechen zahlreiche Autoren bei beiden Methoden von einer Ausrichtung der Fasern „nach dem Kraftfluss“. Dass es bei beiden Theorien jedoch zu einer unterschiedlichen Faserorientierung kommen muss, kann am Mohr'schen Spannungskreis für einen Zugbeanspruchungszustand gezeigt werden.

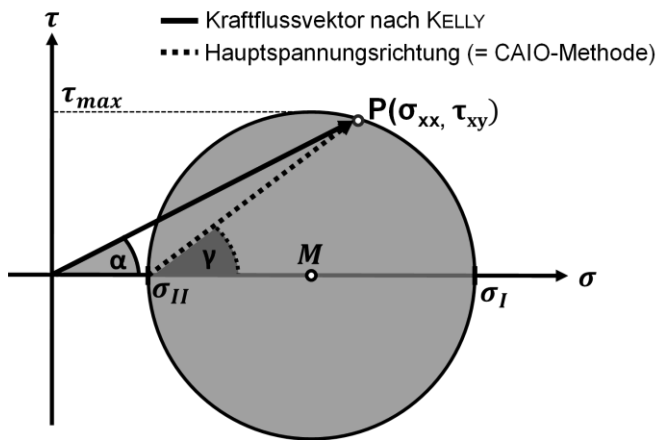


Bild 7: Unterschied der beiden Theorien am Mohr'schen Spannungskreis

Die Winkeldifferenz  $\delta$  zwischen dem Winkel des Kraftflussvektors  $\alpha$  und der Hauptspannungsrichtung  $\gamma$  zur  $\sigma$ -Achse lässt sich anhand der in Bild 7 dargestellten Begebenheiten über

$$(4) \quad \delta = \alpha - \gamma = \arctan\left(\frac{\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{II}}\right) - \arctan\left(\frac{\tau_{xy}}{\sigma_{xx}}\right)$$

angeben. Es wird daraus sofort ersichtlich, dass die Orientierungsvektoren aus Kraftflusstheorie und die Hauptspannungsrichtung nur unter zwei Voraus-

setzungen die gleiche Richtung aufweisen. Zum einen, wenn die minimale Hauptspannung  $\sigma_{II}$  sich zu Null ergibt und damit der Startpunkt beider Vektoren quasi zusammenfällt und zum anderen, wenn die Schubspannung  $\tau_{xy}$  null wird. So lange allerdings die minimale Hauptspannung  $\sigma_{II}$  nicht gleich null wird und eine Schubspannung vorhanden ist, wird es immer zu einer Differenz zwischen Kraftflusstheorie und Hauptspannungsrichtung kommen. So lässt sich eindeutig zeigen, dass es vor allem im Bereich erhöhter Schubspannungen zu Differenzen zwischen den Theorien kommt [17].

## 5 Evaluierung der Theorien am Beispiel einer vereinfachten B-Säule

Wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt werden konnte, führen beide Theorien zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Faserorientierung. Zwar konnte in [17] bereits anhand sehr einfacher Bauteile nachgewiesen werden, dass die CAIO-Methode einen Vorteil haben kann, doch es wurden nur ebene Bauteile verwendet. Ob sich dieser Vorteil auch bei einem komplexen dreidimensionalen Bauteil ergibt, wird im Folgenden untersucht.

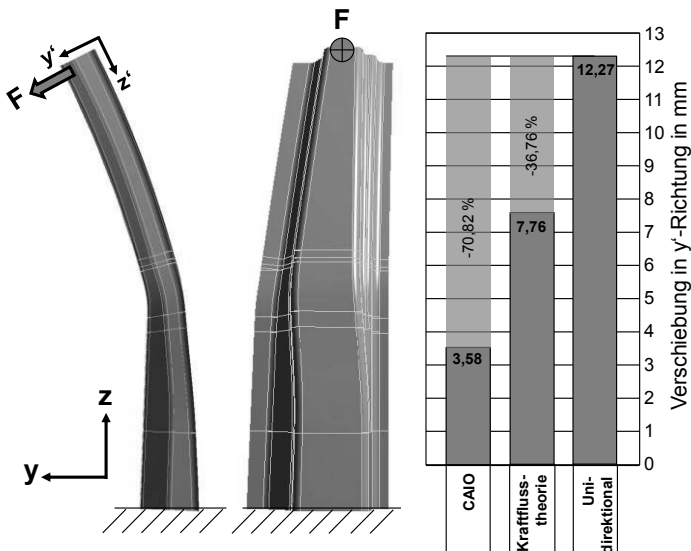


Bild 8: Evaluierung der Theorien am Beispiel einer vereinfachten B-Säule eines PKWs

In Bild 88 ist deshalb eine vereinfachte B-Säule eines PKWs dargestellt, die am unteren Ende fest eingespannt ist und mit der Kraft F hauptsächlich

---

auf Biegung belastet wird. Der Vektor der Kraft  $F$  zeigt dabei in Richtung der lokalen Koordinatenachse  $y'$ . Für diesen Belastungsfall werden die Faserorientierung nach der CAIO-Methode und der Kraftflusstheorie nach Kelly (Kraftfluss in globaler  $z$ -Richtung) errechnet und auf das Bauteil übertragen. Zudem wird als Referenz ein unidirektionaler Laminataufbau generiert. Die Fasern zeigen bei dieser unidirektionalen Ausrichtung in Längsrichtung ( $z$ -Richtung) des Bauteils und müssten damit bei gegebener Biegebelastung eine belastungsgerechte Faserausrichtung darstellen. Die Bauteilsteifigkeit kann bei dem Modell über die Verschiebung entlang der  $y'$ -Achse des lokalen Koordinatensystems bewertet werden. Eine Berechnung der Modelle ergibt bei der unidirektionalen Faserausrichtung eine Verschiebung von 12,27 mm und erlaubt damit die größte Verschiebung. Die Anwendung der Kraftflusstheorie führt zu einer um 36,76 % geringeren Verschiebung von nur noch 7,76 mm und die CAIO-Methode führt sogar zu einer Reduktion der Verschiebung um 70,82 % auf nur mehr 3,58 mm. Damit zeigt sich zwar eindeutig, dass durch die Verwendung beider Theorien bei der Auslegung des Laminats eine signifikante Steigerung der Bauteilsteifigkeit auch bei drei-dimensionalen Bauteilen möglich ist. Doch wie schon in [17] führt die CAIO-Methode noch einmal zu deutlich besseren Steifigkeitswerten als die Kraftflusstheorie nach Kelly. Auch bei der Auswertung der Bauteilfestigkeit nach den Kriterien von Puck führt die CAIO-Methode zu besseren Ergebnissen als die Kraftflusstheorie. Auf eine Darstellung muss an dieser Stelle aber verzichtet werden.

## 6 Zusammenfassung

Wie zu Beginn des Beitrags gezeigt werden konnte, hängen die Eigenschaften faserverstärkter Kunststoffe erheblich von einer belastungsgerechten Faserorientierung ab. Zur Berechnung dieser belastungsgerechten Faserorientierung existieren in der Literatur zwei Verfahren, die CAIO-Methode und die Kraftflusstheorie nach Kelly. Die CAIO-Methode orientiert sich dabei am bionischen Prinzip des Baum- und Knochenwachstums, bei dem die Fasern iterativ entlang der Hauptspannungstrajektorien ausgerichtet werden, wohingegen die Kraftflusstheorie auf einer konsistenten Theorie zur Errechnung des Kraftflusses in mechanisch beanspruchten Strukturen basiert. Obwohl beide Theorien in zahlreichen Werken als eine „Auslegung nach dem Kraftfluss“ bezeichnet werden, konnte in diesem Beitrag anhand des Mohr'schen Spannungskreises gezeigt werden, dass sich unterschiedliche Faserorientierungen insbesondere in schubspannungsbelasteten Bereichen ergeben müssen. Welche Faserorientierung sich besser für die Auslegung von komplexen, drei-dimensionalen Bauteilen eignet, war bisher aber nicht eindeutig geklärt. Deshalb wurden die Faserorientierungen in einer hauptsächlich auf Biegung belasteten B-Säule eines PKWs nach beiden Theorien berechnet und auf ein FE-Modell übertra-

---

gen. Dabei konnte gezeigt werden, dass beide Theorien deutlich besser abschneiden als die bisher oft benutzte unidirektionale Faserorientierung, dass die CAIO-Methode aber sowohl in Bezug auf Steifigkeit als auch Festigkeit der B-Säule noch einmal erheblich bessere Ergebnisse liefert als die Kraftflussmethode nach Kelly. Eine gezielte Ausrichtung nach den Hautspannungstrajektorien scheint demnach bei der Ausrichtung der Fasern von Vorteil zu sein. Bereits Puck berücksichtigte in [19] bei seinem Festigkeitskriterium, dass die Festigkeit beim Vorhandensein von Schubspannungen erheblich abnimmt.

## Literatur

- [1] Trechow, P.: "Leichtbauingenieure helfen Autos beim Abspecken", VDI Nachrichten, 22.02.2013.
- [2] Henning, F.; Moeller, E.: „Handbuch Leichtbau“, Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [3] Kraus, J.: „CCeC-Automotive-Forum 2012 – Automobilbau geht mit unterschiedlichen Strategien den CFK-Leichtbau an“, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/konstruktion/werkstoffe/articles/373134/>, 15.05.2013
- [4] Trechow, P.: „Leichtbau wird Materialmix von Autos massiv verändern“, VDI Nachrichten, Düsseldorf, 06.01.2012
- [5] Müller-Wondorf, R.: „CFK punktet mit Leichtigkeit“, VDI-Nachrichten, 15.05.2013
- [6] Wiedemann, M.: „CFK –Status der Anwendung und Produktionstechnik im Flugzeugbau“, Faszination Karosserie, Braunschweig, 25.-26. März 2009
- [7] Meyer, O.: „Kurzfaserverform-Technologie zur kraftflussgerechten Herstellung von Faserverbundbauteilen“, Universität Stuttgart, Dissertation, 2008
- [8] Mattheck, C.; Bethge, K.: „The Structural Optimization of Trees“, Naturwissenschaften 85 1-10, Springer-Verlag, 1998
- [9] Mattheck, C.; Reuschel, D.: "Design nach der Natur", Physik unserer Zeit, Nr. 6, 30. Jahrgang, 1999

- 
- [10] Kriechbaum, R.: „Ein Verfahren zur Optimierung der Faserverläufe in Verbundwerkstoffen durch Minimierung der Schubspannungen nach Vorbildern der Natur“, Bericht KfK 5406, Kernforschungszentrum
- [11] Moldenhauer, H.: „Berechnung variabler Faserverläufe zur Optimierung von Compositestrukturen“, Lighthouse Design, 01/2011
- [12] Reuschel, J. D.: „Untersuchung der Faseranordnung natürlicher Faserverbunde und Übertragung der Ergebnisse auf technische Bauteile mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode“, Forschungszentrum Karlsruhe, Dissertation, 1999
- [13] Kelly, D. W.; Elsley, M.: “A Procedure for determining load paths in elastic continua”, Engineering Computations, Vol. 12 Issue 5, S. 415-424, 1995
- [14] Moldenhauer, H.: „Die Visualisierung des Kraftflusses in Stahlbaukonstruktionen“, Stahlbau, Volume 81 Issue 1, S. 32-40, 2012
- [15] Kelly, D. W.; Tosh M. W.: “Interpreting load paths and stress trajectories in elasticity”, Engineering Computations, Vol. 17 Issue 2, S. 117-135, 2000
- [16] Kelly D. W.; Hsu P., Asudullah, M.: “Load paths and load flow in finite element analysis”, Engineering Computations, Vol. 18 Issue ½, S. 304-313, 2001
- [17] Klein, D.; Caballero, S.; Wartzack, S.: “Berechnung beanspruchungsgerechter Faserorientierungen in CFK-Strukturen”, 31th ANSYS & CADFEM Users' Meeting, Mannheim, 2013
- [18] Putz, R; Pabst, R.: „Sobotta - Atlas der Anatomie des Menschen“, 23. Auflage, Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH, 2010
- [19] Puck, A; Schürmann, H.: “Failure Analysis Of LRP Laminates By Means Of Physically Based Phenomenological Models”, Composite Science and Technology 58, S. 1045-1067, 1998